АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Таджибаев А.И.

Санкт-Петербург
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Санкт-Петербургское отделение
2002

А в т о р: А.И.Таджибаев

Р е ц е н з е н т ы: профессор С.В.Смоловик (СПбГТУ);

НПО «Электрокерамика»

Автоматизированные системы распознавания состояний электроустановок / А.И.Таджибаев. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2002. – 224с.: с ил.

Рассмотрен комплекс научных и технических проблем, связанных с разработкой методических основ распознавания состояний электроустановок. Рассмотрены причины возникновения и развития дефектов, приводится анализ первичных признаков анормальных состояний оборудования электрических станций, подстанций и промышленных предприятий. Представлены результаты разработок алгоритмов оценки состояния.

Предназначена для специалистов, инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и внедрением в эксплуатацию технологий и систем оценки состояния электроустановок.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Характерной особенностью современного состояния электроэнергетики является все более возрастающая роль в проблемах обеспечения надежности и безопасности эксплуатации предприятий систем оценки состояния электроустановок. Определяется это целым комплексом причин: желанием при прочих равных условиях продлить срок службы оборудования, когда требуется увеличение интенсивности контроля состояния; необходимостью своевременного выявления дефектов с целью принятия адекватного решения; необходимостью определения первичных причин возникновения отказа. Вместе с тем, последние годы в рассматриваемой области наблюдается все более широкое проникновение современных технологий обработки данных, классических теоретических разработок. Одной из важнейших базовых теоретических областей, на которую опираются методы и средства оценки состояния оборудования электрических станций и подстанций, является распознавание образов. Уже первые попытки внедрить это направление в практику обслуживания показали совершенно новые горизонты при решении сложных проблем оценки состояния.

С учетом изложенного, настоящая книга посвящена проблемам разработки методических основ распознавания состояний электроустановок.

Автор надеется, что материалы, содержащиеся в книге, могут оказать определенную помощь специалистам, занимающимся разработками систем оценки состояния электроустановок.

Замечания и отзывы по книге просьба направлять по адресу: 196135, Санкт-Петербург, ул.Авиационная, 23, ПЭИПК.

Автор

ГЛАВА 1. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Надежность и безопасность эксплуатации электрических станций, подстанций и систем электроснабжения промышленных предприятий определяется безаварийной работой электрооборудования. Высокие требования к экономичности и экологичности электроустановок невозможно без соответствующего технического состояния, а, следовательно, без методического обеспечения для реализации функций обследования.

Анализ повреждаемости маслонаполненного оборудования. *Силовые трансформаторы.* При анализе повреждаемости силовых трансформаторов целесообразно разделить их на две группы по величине номинального напряжения, поскольку процентное соотношение видов повреждений для трансформаторов низших классов (до 110 кВ включительно) и высших классов существенно отличаются. Наблюдаются также отличия в статистике повреждений для разных энергосистем и регионов, что обусловлено особенностями режимов эксплуатации и составом эксплуатируемого оборудования. В таблице 1.1 приводятся обобщенные данные по статистике повреждений силовых трансформаторов низших и высших классов напряжения. Анализ показывает, что для трансформаторов низших классов напряжения наиболее распространенными причинами отказов являются нагрев токоведущих соединений и увлажнение. Для высших классов напряжения основное количество повреждений связано с повреждением изоляции.

Помимо видов повреждений представляет интерес рассмотрение места повреждения в трансформаторах. В таблице 1.2 приведены статистические характеристики мест повреждений в силовых трансформаторах. Данные по высшим классам напряжений показывают что, основное количество повреждений связано с повреждением изоляции.

Таблица 1.1.

Причины отказов силовых трансформаторов.

№ п/п	Причина отказа	Число отказов в %	
		Классы напряжения	
		≤110 кВ	>110 кВ
1	Отказы без обнаружения причин	31	25
2	Ухудшение и нарушение изоляции в эксплуатации	5	25
3	Повреждения соединений переключающих устройств	14	7
4	Повреждения токоведущих соединений отводов	12	8
5	Повреждения, сопровождающиеся частичным разрядом в изоляции	10	10
6	Деформации обмоток	2	6
7	Увлажнение	15	7
8	Термохимическое старение	4	5
9	Загрязнение	4	3
10	Газонасыщение	1	2
11	Прочие нарушения	2	2

Помимо видов повреждений представляет интерес рассмотрение места повреждения в трансформаторах. В таблице 1.2 приведены статистические характеристики мест повреждений в силовых трансформаторах. Данные

таблицы показывают, что основными элементами, вызывающими наибольшее количество отказов трансформаторов являются обмотка и вводы.

Высоковольтные вводы. Поскольку аварийность вводов составляет значительную часть аварийности силовых трансформаторов, представляет интерес анализ причин их отказов. В таблице 1.3 приведены данные по статистике аварийности высоковольтных вводов. Из данных таблицы обращает на себя внимание перекрытие по низу фарфора. В эксплуатации бытует мнение, что этот вид повреждения вызывается появлением на внутренней поверхности нижней фарфоровой покрышки желто-бурого налета. Действительно, как правило, при перекрытии по низу фарфора на поверхности имеется такой осадок, однако, при разборке других вводов, в том числе и не доведенных до аварий часто наблюдается такой же налет. Образование налета и перекрытие по низу фарфора связано преимущественно с выделением серосодержащих продуктов из масла и уплотняющих резиновых деталей, чему способствуют высокие температуры нижней части вводов. Следует отметить, что проблема обеспечения электрической прочности обострилась при переходе на облегченную конструкцию нижней части вводов и использовании масла типа ГК. По-видимому, перекрытие по низу фарфора определяется совокупностью рассмотренных причин, которые должны устраняться в основном на стадии изготовления.

Измерительные трансформаторы. Отказы измерительных трансформаторов имеют сравнительно более легкие последствия по сравнению с силовыми трансформаторами и высоковольтными вводами, однако, исключить их из рассмотрения не представляется возможным. Статистика их аварийности приведена в таблице 1.4. В таблице 1.4 обращает на себя внимание большое число отказов измерительных трансформаторов напряжения по неустановленным причинам, то есть отказов, которым не

Таблица 1.2.

Распределения отказов между конструктивными элементами силовых трансформаторов мощностью ≥100 МВА

Элемент конструкции	Вид повреждения	число отказов в % к общему числу
1 Обмотки	Электрический пробой	14,00
	Механическая деформация	10,70
	Термический износ	1,60
	Всего	26,30
2 Главная изоляция обмоток и отводов	Диэлектрический пробой, частичные или ползущие разряды	14,00
3 Остов, электромагнитные шунты	Перегрев, искрение в масле	8,30
4 Отводы	Повышенный нагрев, механические повреждения	4,10
5 РПН	Перегрев контактов	8,30
	Повреждение или ч.р. в изоляции	5,00
	Механические нарушения	0,83
	Всего	14,13
6 Вводы	Пробой внутренней изоляции	28,00
	Перегрев контактных соединений	5,17
	Всего	33,17
	Итого	100

Таблица 1.3.

Распределение видов повреждений высоковольтных вводов

№ п/п	Вид повреждений	Число отказов в % к общему числу
1	Пробой остова	10
2	Перекрытие остова	12
3	Перекрытие по низу остова	44
4	Течь масла	5
5	Перегрев внутренних контактных соединений	12
6	Перегрев наружных контактных соединений	2
7	Неустановленные причины	15

Таблица 1.4.

Распределение видов повреждений в измерительных трансформаторах

№ п/п	Вид повреждения	Число отказов в %	
		Трансформаторы тока	Трансформаторы напряжения
1	Главная изоляция	84	40
2	Витковая изоляция	2	10
3	Перекрытие по наружной поверхности	12	–
4	Неустановленные причины	2	50

предшествовали видимые изменения состояния трансформатора. Очевидно, что основная часть этих отказов обусловлена не собственными характеристиками трансформаторов, а режимами работы сети, в которой они установлены. Действительно, измерительные трансформаторы напряжения представляют собой конструкцию с магнитной системой, рабочая точка которой находится близко к насыщению, и даже сравнительно небольшое повышение напряжения на трансформаторе может привести к резкому увеличению потерь в нем и потере тепловой устойчивости. Такие повышения напряжения могут появляться, например, в результате возникновения режимных перенапряжений. Поэтому снижения аварийности трансформаторов напряжения по неустановленным причинам можно достигать путем оптимизации режимов работы сети, в которой они установлены.

Анализ аварийности маслонаполненного оборудования, а особенно наиболее дорогостоящего - высших классов напряжения, показывает, что основное количество отказов связано с повреждением изоляции, поэтому вопросам контроля и диагностики изоляции необходимо уделять наибольшее внимание. Существующая нормативная система электрических испытаний силовых трансформаторов включает в себя измерения сопротивления изоляции обмоток, тангенса угла диэлектрических потерь изоляции обмоток, емкости изоляции обмоток, сопротивления обмоток постоянному току, тока и потерь холостого хода. Измеренные характеристики обычно сравниваются с исходными, указанными в паспортах и протоколах заводских испытаний, а также с результатами измерений, полученных для оборудования такого же типа, либо с измеренными ранее на данном объекте. На основании сопоставления всех характеристик может быть дано заключение о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования.

Обзор опыта эксплуатации оборудования и диагностики на основе нормативной системы электрических испытаний показывает, что общим

недостатком методов профилактических испытаний является их низкая чувствительность к выявлению дефектов и практическая невозможность обнаружения локальных повреждений, особенно в начальной стадии их развития. Случаи отбраковки по выявленными этими методами дефектам не превосходят 3%, а для трансформаторов высших классов напряжения еще меньше. Практика применения нормативной системы показала, что большинство дефектов, выявленных с ее помощью, не являются причинами, приводящими к повреждению силовых трансформаторов. По самым строгим оценкам их доля в общем объеме повреждений не превосходит 10%.

Для разработки эффективных систем диагностики изоляции маслонаполненного оборудования необходимо рассмотреть физико-химические механизмы ее старения и образования дефектов, использовать методологические основы многопараметрического анализа.

В р а щ а ю щ е е с я   э л е к т р и ч е с к о е   о б о р у д о в а н и е. Вращающееся электрооборудование является наиболее сложным с точки зрения эксплуатации и контроля состояния. Статистика отказов является важным фактором, определяющим к каким именно конструктивным элементам необходимо уделять больше внимания при организации обследований. В таблице 1.5 приведена статистика повреждений турбогенераторов, сгруппированных по сборкам и причинам отказов.

Повреждения элементов ротора и статора распределены приблизительно одинаково, причем на дефект изоляции приходится значительная доля отказов. Характерным является большой объем дефектов в цепях возбуждения на начальном этапе эксплуатации генератора. Отказы в системе возбуждения как правило сопровождались потерей устойчивости. Исследования характера отказов показывают, что подавляющее число неисправностей возникает в результате развития дефектов, заложенных на этапе изготовления. Это подчеркивает тот факт, что мощным повышением

Таблица 1.5.

Распределение отказов по узлам генераторов

Сборочный узел	Причина отказов	Процент от общего числа отказов
I Обмотки	1. Замыкание элементарных проводников	0,42
	2. Междувитковые замыкания	1,27
	3. Повреждения корпусной изоляции	3,93
	4. Перегрев элементарных проводников	0,21
	5. Внутренняя корона	0,74
	6. Корона в точках потери контакта с сердечником	2,23
	7. Повреждения полупроводящего покрытия	0,11
	8. Пазовые разряды	8,81
	9. Отслоение полупроводящего покрытия	3,50
	10. Вибрация обмотки в пазу	7,64
II Уплотняющие прокладки в пазу (ослабление, выпадение, перегрев)	1. Клинья	15,50
	2. Подклиновые прокладки	12,95
	3. Боковые уплотнения	5,41
	4. Прокладки между стержнями	3,29
	5. Прокладки на дне паза	0,74
III Перемычки		3,18
IV Головки, соединения	1. Головки (ослабление, коронирование)	4,03
	2. Соединения (ослабление, поломка)	5,63
V Железо статора	1. Нажимные плиты	3,93
	2. Стыковые соединения	2,12
	3. Шихтовка, вибрация, фреттинг	6,05
	4. Перемещение отдельных листов	0,21
	5. «Волна» шихтовки	3,82
	6. Крепление статора	4,25

резерва надежности эксплуатации генератора является выявление дефектов на ранней стадии развития, что позволит уменьшить объем внезапных отказов и уменьшить объем разрушений. Все более важное значение приобретают автоматизированные системы контроля.

Статистика повреждаемости электродвигателей показывает на сравнительно большой объем дефектов в подшипниковых узлах особенно у двигателей 0,4 кВ [84, 220]. Как правило, это не поддержано адекватными мерами контроля. Следующей по объему причиной является увлажнение изоляции статора. Как показывает опыт эксплуатации 80 % всех повреждений короткозамкнутых обмоток является следствием механических и температурных факторов в процессе пуска. Обрыв в стержнях сопровождается повреждениями в статоре за счет механического воздействия.Для машин постоянного тока характерными являются повреждения коллекторно-щеточного узла, объем которых может достигать 60 %.

Коммутационные аппараты. В рамках проведенных обследований доля повреждений, приходящихся на коммутационные аппараты, составляет около 28% в классе напряжений 110-350 кВ. около 19% в классе напряжений 0,4-35 кВ от общего объема отказов. Цифры достаточно велики, но учитывая одну из важнейших особенностей, заключающуюся в том, что назначением выключателей является обеспечить разрыв или замыкание цепи, то в аварийной ситуации отказ коммутационного аппарата приводит к резкому расширению объема отключенных присоединений и к развитию цепочечных аварий. В таблице 1.6 приведено распределение повреждений между конструкционными элементами, приводящих к отказу. Имеющийся опыт обследования показывает, что более 70 % всех причин отказов может быть выявлено на ранних стадиях развития. Большой объем отказов связан со слабой изученностью проблем возникновения и развития дефектов и

Таблица 1.6.

Распределение повреждений между конструктивными элементами коммутационных аппаратов.

№ п/п	Конструктивный элемент	Доля отказа от общего объема отказов аппарата, %
0,4 кВ		
1.	Токоведущие части	42,5
2.	Устройства привода	57,5
6-35 кВ		
1.	Дугогасящая камера	18
2.	Привод	26
3.	Цепи управления	42
4.	Опорная изоляция, вводы	14
110-750 кВ		
1.	Дугогасящая камера	24
2.	Привод	21
3.	Цепи управления	28
4.	Опорные изоляторные конструкции	12
5.	Высоковольтные вводы	11
6.	Вспомогательное оборудование	4
Разъединители 110-750 кВ		
1.	Токоведущие части	42
2.	Привод	30
3.	Изоляционные конструкции	28

недостаточным объемом внедрения методов и технических средств оценки состояния коммутационных аппаратов.

Анализ повреждаемости кабельных линий 6-35 кВ. Общая длина кабельных изделий используемых в эксплуатации для различных целей составляет значительную величину. Так, например, длина кабельной сети 6 кВ АО «Ленэнерго» составляет 7010 км, причем имеет около 67000 соединительных и концевых муфт. Системы электроснабжения собственных нужд (СЭСН) тепловых и атомных электрических станций имеет общую протяженность достигающую 210 км. Большая протяженность кабельных линий, прокладка их, как правило, в подземных коммуникациях требует больших затрат на обслуживание, в том числе на выявление повреждений. В таблице 1.7 представлено процентное соотношение видов повреждений кабельной сети 6-10 кВ г. Пскова в 1993 году.

В эксплуатации большая часть кабелей имеет бумажно-масляную изоляцию, которая за многие годы эксплуатации показала высокую надежность и длительность в эксплуатации без замены. Вместе с тем большой объем кабелей уже отработал свой заводской ресурс, в связи с чем существует ряд проблем эксплуатации. Наибольшее число отказов приходится на неповрежденную часть кабеля. Значительная часть из них приходится на развитие дефектов, возникших в процессе изготовления и эксплуатации. Обследование кабельного хозяйства многих предприятий показывает, что большой процент повреждений связан с прямыми механическими воздействиями. Одной из основных причин большой роли этого типа отказов является плохая оснащенность приборами и методами трассировки подземных коммуникаций и поиска мест повреждений. Основная часть коррозионных происходит из-за почвенной коррозии, усиленной действием блуждающих токов и усугубляется плохой организацией и отсутствием эффективных методов обследования грунта, блуждающих токов и потенциалов оболочек.

Повреждаемость соединительных и концевых муфт достаточно подробно описана в таблице 1.7. Последующие годы наблюдения показали, что доля повреждений, приходящихся на соединительные муфты, постоянно возрастает при небольшом уменьшении повреждаемости концевых муфт (рис. 1.1). Это объясняется двумя причинами: уменьшением общей длины кабелей, участвующих в эксплуатации и увеличении роли кабелей, отработавших свой ресурс. В СЭСН тепловых и атомных электрических станций в ряде случаев наблюдалось возгорание кабелей. Нарушение термической стойкости связано со значительными временами отключения при отказах основных защит, а также возникновением термических усталостных явлений. Ситуация усложняется в связи с широким применением кабелей с полимерной изоляцией, имеющих меньший запас по ресурсу и термической стойкости.

Приведенные обстоятельства указывают на необходимость разработки методов неразрушающего контроля и оценки состояния остаточного ресурса.

Повреждаемость опорных и подвесных изоляционных конструкций. Выделение в качестве объекта исследования указанных элементов связано с тем, что изоляционные конструкции, используемые в различных высоковольтных электроустановках, а также эксплуатируемые в качестве самостоятельных узлов открытых распределительных устройств (ОРУ) и линий электропередачи (ЛЭП) являются самыми многочисленными в любом классе напряжения. Обследованию были подвергнуты более 20 тысяч конструкций в классе напряжений 6-550 кВ, при этом были получены следующие результаты. Полностью исправными оказались 27,8% изделий. Остальные изделия с соответствующими дефектами распределились следующим образом: 4,2% конструкций имеет визуально наблюдаемые трещины в фарфоре и металлических фланцах и требуют немедленной замены; 18,1% - имеет внутренние трещины, как правило в концевых узлах и большой объем глубоко проникающих микроскопических трещин, связанных между собой и приводящих к большому количеству впитываемой влаги и

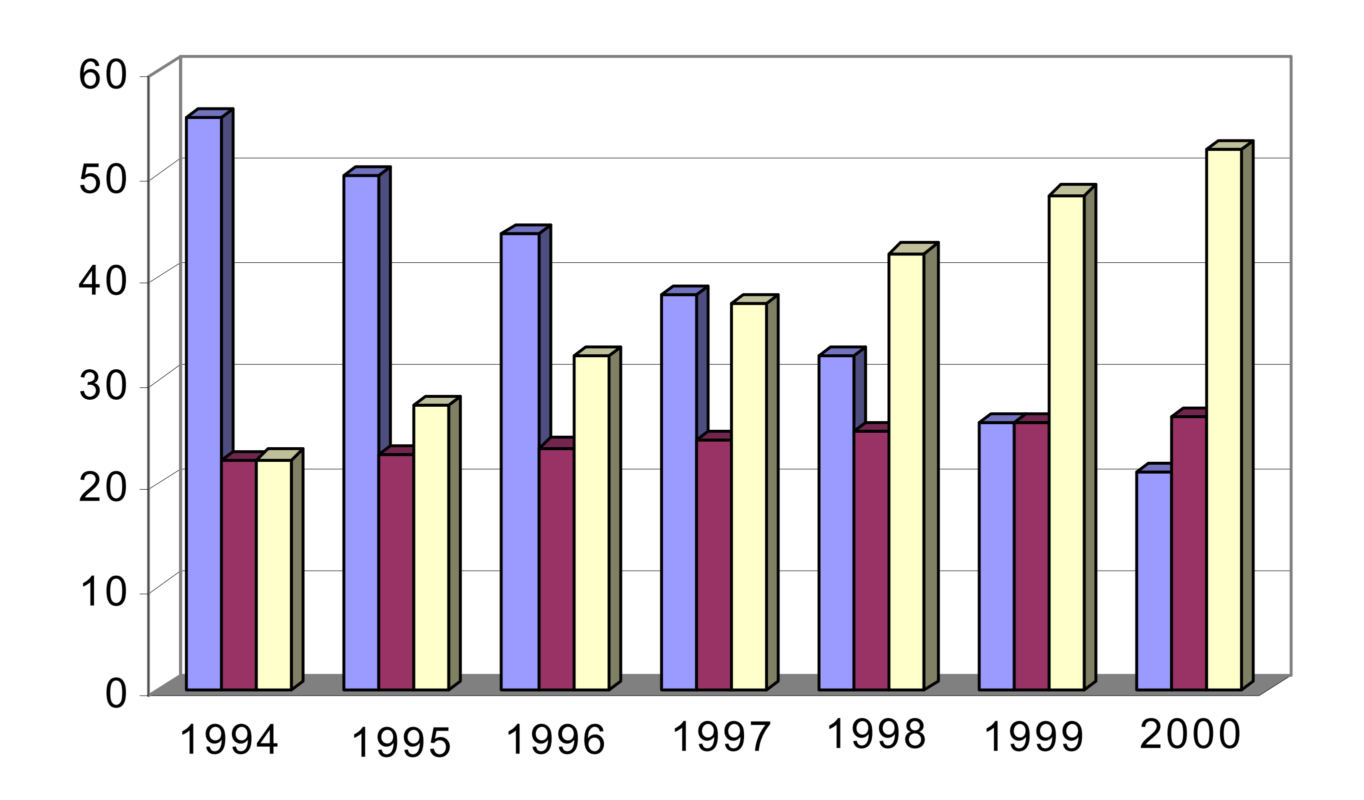


Рис. 1.1. Изменение повреждаемости кабельной сети.

□ – повреждения кабелей; □ – повреждения соединительных муфт;

■ – повреждения концевых муфт.

Таблица 1.7.

Повреждаемость кабелей городской сети 6-10 кВ.

№ п/п	Причина отказа	Доля отказа, %
Общая повреждаемость кабельного хозяйства		
1.	Коррозия металлических оболочек	14,9
2.	Развитие ранее возникших дефектов	20,6
3.	Прямые механические повреждения	19,9
4.	Повреждения соединительных муфт	22,2
5.	Повреждения концевых муфт	22,4
Повреждаемость соединительных муфт		
6.	Пробой из-под рулона	21,5
7.	Вспучивание оболочки кабеля у горловины муфты.	17,2
8.	Дефект в пайке гильз	15,2
9.	Излом изоляции	11,4
10.	Дефект в пайке жил	19,0
11.	Дефект в пайке горловины	7,6
12.	Прямые механические повреждения	8,1
Повреждаемость концевых муфт		
13.	Трещины втулок	10,4
14.	Пробой в полихромвиниловых заделках	4,9
15.	Повреждения из-за дефекта монтажа в стальных воронках	17,5
16.	Пробои в муфтах	20,6
17.	Причина не установлена	46,6

быстрому разрушению при температурных перепадах разной полярности (требуется замена при первой возможности и постоянный контроль до замены); 15,4% - имеет систему микроскопических трещин, проникающих относительно не глубоко (конструкции могут оставаться в работе в установках, не приводящих к механическим воздействиям), требует дополнительных мер по защите от внешних воздействий и периодического контроля с увеличением частоты в осенне-зимний и весенне-зимний периоды; 42,5 – самая многочисленная группа изделий, имеющих начальную стадию возникновения микротрещин, пустоты и включения, находящиеся в непосредственной близости к поверхности (могут находиться в эксплуатации без ограничений, но требуют периодического контроля).

В зависимости от типа электроустановки статистика видоизменяется. Например, изоляционные конструкции, входящие в разъединители имеют только 12% не имеющих дефектов, причем значительно возрастает доля с дефектами, требующими ограничений в эксплуатации, до 42,3% против 29,7%. Увеличение объема дефектных конструкций связано с наложением на традиционные причины усталостных разрушений. Анализ показывает, что доля дефектов по вине изготовителя, как правило, невелика и составляет от 3% до 5% от общего парка изделий.

Проведенные обследования на различных предприятиях показывают, что, к сожалению, эксплуатационный контроль поставлен на низком уровне. Существующая нормативная документация ориентирована на выявление преимущественно явных дефектов. Последние годы широкое применение приобрели изоляционные конструкции на полимерной основе, для которых не разработаны методики контроля и диагностики.

Высокий уровень аварийности, обусловленный с одной стороны большим объемом отработавшего свой ресурс оборудования, а с другой слабым развитием методов и технических средств эксплуатационного контроля и диагностики. На некоторых предприятиях объем состарившегося оборудования достигает 80-90 %. Обновление оборудования происходит

медленно и составляет около 2-10 % в год, причем верхнее значение характерно для относительно небольшого числа благополучных предприятий. Другими словами обновление оборудования не позволяет решить проблему необходимого уровня надежности.

Проведенный анализ позволяет отметить следующие основные особенности эксплуатации высоковольтных электроустановок: рост объема отказов в условиях, когда число реально участвующего в эксплуатации оборудования падает; высокий процент оборудования, отработавшего свой заводской ресурс и требующего мер по обеспечению необходимого уровня надежности; невозможность в силу экономических условий обеспечить необходимый уровень надежности только обновлением оборудования; необходимость обеспечения надежности эксплуатации путем внедрения системы интенсивного сервисного обслуживания; отсутствие отработанных методик выявления дефектов на ранних стадиях развития; необходимость в разработке методических основ в оценке состояния электрооборудования, как базы для внедрения автоматизированных систем контроля и диагностики.

Решение проблем разработки методической основы должно базироваться, прежде всего, на анализе причин возникновения и развития дефектов в электрооборудовании. Приведенная статистика показывает, что многим повреждениям предшествуют анормальные режимы, приводящие к интенсивному развитию дефектов и в конечном итоге к катастрофическому отказу. Это ставит соответствующие задачи, решаемые в последующих параграфах данной главы.

ГЛАВА 2. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

2.1. Этапы разработки способов оценки состояния электроустановок

Назначение систем оценки состояния состоит в том, чтобы определить к какому классу может быть отнесено текущее состояние электрооборудования, то есть установить, что $b_j \in A_i$, $j = \overline{1,N}$; $i = \overline{1,M}$, где j – номер объектов распознавания, i – номер класса. Полученные таким образом данные служат основой для выработки соответствующего решения. Поэтому при обосновании и разработке алгоритмов распознавания необходимо исходить из задачи обеспечения наибольшей эффективности решений. В общем случае, если число возможных решений z, то число классов в системе распознавания должно быть равно $M=z+1$, причем $b_i \in A_{z+1}$ соответствует $z+1$ случаю, когда решение не может быть принято.

Если отвлечься от проблем реализации системы, то можно отметить следующее, что при заданном фиксированном числе классов расширение количества признаков приводит к увеличению вероятности правильного решения задачи $P_{пр}$, и наоборот. Однако очевидным является и реализационный аспект этой же задачи – увеличение признакового пространства сопряжено с усложнением системы оценки состояния электрооборудования, как ее аппаратной части, так и математического и программного обеспечения. Измерение признака x_ℓ требует затрат ресурсов: материальных, энергетических, временных и т.п. Обозначим затраты на измерение признака x_ℓ через C_ℓ. Если размер ресурса ограничен C_0, то задача заключается в том, чтобы обеспечить неравенство

$$\sum_{\ell=1}^{n} C_\ell \le C_0 .$$

Если признаковое пространство, обеспечивающее заданную вероятность $P_{пр}$ правильного распознавания $M=z+1$ классов, обеспечивает выполнение неравенства, то задача построения основы системы распознавания приобретает простейший характер.

При невыполнении таких условий возникает более сложная задача. Требуется в пределах выделенных ресурсов найти такой перечень классов и признаков, который обеспечил бы максимальное значение эффективности решений. В качестве критерия эффективности может использоваться математическое ожидание выигрыша G($A_i^{k_\alpha}$), связанное с реализацией возможных решений при распознавании состояний b_j, отнесенного к классу A_i в варианте классификации k_α:

$$R = M\left[G\left(A_i^{k_\alpha}\right)\right] = \sum_{i=1}^{M} P_{пр}\left(A_i^{k_\alpha} / \lambda\right) G\left(A_i^{k_\alpha}\right) ,$$

где λ - вектор, элементы которого λ_ℓ, $\ell = \overline{1,n}$ принимают значение 1 и 0 в зависимости от того, используется ли признак x_ℓ или нет. При построении системы распознавания состояний необходимо определить такой вариант k_α^0 разбиения состояний на классы и такой перечень признаков, определяемый вектором λ^0, чтобы обеспечить

$$R\left(k_\alpha^0, \lambda^0\right) = max\, max\, R\left(k_\alpha, \lambda\ \right) = max\, max \sum_{i=1}^{M} P_{пр} = \max_{k_\alpha} \max_{\underline{\lambda}} \sum_{i=1}^{M} P_{пр}\left(A_i^{k_\alpha} / \overline{\lambda}\right) G\left(A_i^{k_\alpha}\right)$$

при соблюдении условия $C=\sum_{i=1}^{M}\lambda_{\ell}C_{\ell}\le C_0$. Именно в таком случае ограничений принимается решение выбора числа классов и признаков.

Решение задачи распознавания состояний электрооборудования включает следующие этапы:

1) анализ путей использования информации распознавания и выбор перечня классов состояний, подлежащих различению;

2) определение признакового пространства и уточнение перечня классов состояний;

3) разработка алгоритмов принятия решения в условиях временных и информационных ограничений.

Ряд задач распознавания состояний электрооборудования характеризуется высоким уровнем априорной неопределенности, что сопровождается трудностями оценки вероятностей классов объектов, нахождение законов распределения признаков $f_i(X)$. Трудностей, возникающих в таких условиях можно избежать, использовав процедуры адаптации, оптимально сочетая правила принятия решений и применяемые признаки объектов.

Законы распределения могут меняться при вариации реальных условий эксплуатации. Обозначим совокупность таких условий через γ. Вектор γ может включать различные компоненты: уровень помех, аппаратная погрешность и т.п. Будем полагать, что каждой совокупности условий измерения γ соответствует вероятность $P(x)$. Если для объектов разных классов A_i характерны специфические условия замера, то вектор γ может быть представлен как дополнительный признак распознавания. В этом случае целесообразно знать условные вероятности $P_i(\gamma)$ вектора γ при наблюдении объектов каждого из классов. Вместо законов $f_i(X)$ следует рассматривать

условные законы $f_i(X/\gamma)$, справедливые при наблюдении объектов i-го класса в условиях γ. Когда вероятности условий наблюдения объектов всех классов одинаковы и $P_i(\gamma)=P(\gamma)$, а также когда вектор γ невозможно оценить при распознавании, говорить о нем, как о признаке нецелесообразно.

Уровень развития техники оценки состояния электрооборудования не всегда позволяет решать задачу определения места повреждения. Так хроматографический анализ позволяет определить характер дефекта, но не позволяет определить дефектный конструктивный элемент. Поэтому вместо условных для каждого вида объектов распределений $f_{i\ell}(X)$ на практике чаще всего используют усредненные функции

$$f_i(X) = \sum_{\ell=1}^{L_i} P(X_{i\ell}) f_{i\ell}(X),$$

где $P(A_{i\ell})$ – вероятность того, что множество объектов i-го класса для распознавания будет предъявлен объект ℓ-го вида, а $f_{i\ell}(X)$ - соответствующий закон распределения вероятностей.

Путем усреднения определяются и стоимости ошибочных и правильных решений:

$$C_{ik} = \sum_{\ell=1}^{L_i} \sum_{j=1}^{L_k} P(A_{i\ell}) P(A_{kj}) C_{\ell j},$$

где $C_{\ell j}$ – стоимость отнесения объекта вида $A_{i\ell}$ к виду $A_{k\ell}$, $i,k = \overline{1,M}$.

Учитывая усреднение по всем видам объектов и условиям наблюдения, закон распределения признаков классов можно записать в форме

$$f_i(X) = \sum_{i=1}^{L_i} \sum_{\gamma} P(A_{i\ell}) P_{i\ell}(\gamma) f_{i\ell}(X/\gamma),$$

где $P_{i\ell}(\gamma)$ – вероятность того, что объект вида $A_{i\ell}$ будет наблюдаться в условиях γ.

С учетом изложенного, можно сделать вывод о том, что для различных признаков распознавания X и номеров классов $i = \overline{1,M}$ функция $f_{i\ell}(X/\gamma)$ будет характеризоваться различными степенями отклонения от усредненных законов $f_i(X)$. В этой связи естественно было бы ввести какой-либо количественный показатель, определяющий устойчивость признаков.

Одним из них может быть отношение максимально достижимой с учетом условий γ и разнообразия объектов $A_{i\ell}$ средней вероятности правильного распознавания $\beta_{cp}(\gamma, \ell)$ к вероятности β_{cp}, обеспечиваемой использованием усредненных функций $f_i(X)$. Если потребовать, чтобы показатель устойчивости обращался в нуль при случайном угадывании M равновероятных исходов и в единицу при $\beta_{cp}=\beta_{cp}(\gamma, \ell)$, то соответствующее выражение примет вид

$$\chi=(M\beta_{cp} -1) / [M\beta_{cp}(\gamma, \ell)-1].$$

Важным для практики аспектом, связанным с введенным понятием, обусловленным тем, что зачастую потенциально высокоинформативные признаки распознавания оказываются весьма чувствительными к изменениям условий наблюдения γ. Использование усредненных функций $f_i(X)$ приводит к недопустимо низкой достоверности распознавания β_{cp}. В тех случаях, когда можно достаточно точно оценить условия наблюдения γ, замена функции $f_i(X)$ функциями $f_i(X/\gamma)$ может привести к существенному уменьшению

вероятности ошибки. Например, ракурс тепловизионного обследования электроустановки можно оценить достаточно точно, если доступ к высоковольтному оборудованию обеспечивает фиксированные условия с точки зрения ракурса обследования. В этой ситуации потери, связанные с неустойчивостью признака, могут быть значительно снижены. Невозможность учета γ зачастую обесценивает параметрические процедуры принятия решений, так как они обычно характеризуются высокой эффективностью лишь при стационарных описаниях классов. В этом случае эффективными могут оказаться относительно грубые решающие правила, критичность которых к точности задания априорных характеристик объектов невелика.

Другими словами, для рационального синтеза устройства распознавания состояний электрооборудования следует правильно выбрать комбинацию признаков и решающего правила. Может оказаться, что часть выбранных признаков следует использовать в сочетании с параметрическими решающими алгоритмами, а остальные признаки использовать совместно с более грубыми непараметрическими алгоритмами.

Большинство правил, мало чувствительных к степени устойчивости функций $f_i(X)$, предполагают преобразование исходного пространства признаков $X=\{x\}$ в пространство вторичных признаков $Y=\{y\}$. Целью такого преобразования является получение нового признакового пространства со стабильными и хорошо описываемыми функциями распределения $f_i(Y)$.

В самом простом случае проблема решается обоснованием фиксированной разделяющей поверхности, причем именно таким образом используется разделяющая функция в большом количестве автоматических устройств контроля электроустановок. Однако, в этом случае проблема реализуется далеко не оптимальным образом. В последующем происходит

накопление информации и переход к новым разделяющим поверхностям. Так, например, в результате многолетних исследований автора в области построения устройств распознавания анормальных состояний генератора получена целая серия граничных линий в плоскости комплексного параметра $\dot{z} = \dot{U}\dot{I}^{-1}$. Так, на рис. 2.1 показана серия разделяющих поверхностей алгоритмов выявления асинхронного режима при потере возбуждения. Разделяющая поверхность, обеспечивающая замкнутое пространство, ограниченное плоскостью ABCD, полукругами BEC и AFD, половиной поверхности цилиндра ABECDF (рис. 2.1,а). Такая разделяющая поверхность обеспечивает отстроенность от других режимов генератора введением значительной задержки на время формирования результата распознавания t_y, достигающий в некоторых случаях 2-3 секунд. Однако, дальнейшие исследования показали, что такие времена приводят к значительным разрушительным последствиям в активных частях генератора. Поэтому был предложен алгоритм с новой разделяющей поверхностью, обеспечивающей замкнутое пространство, ограниченное поверхностями части цилиндров ABECDF и A′B′E′C′D′F′, прямоугольниками ABB′A′ и D′C′CD, плоскостями BB′E′C′CE и AA′F′D′DF (рис. 2.1,б). За счет увеличения пространственной селективности удалось снизить выдержку времени. Резервом для дальнейшего совершенствования явилось уменьшение зон охвата диапазона скольжения ротора генератора (рис. 2.1,в).

Это позволило сделать еще один шаг к уменьшению уставки по времени. Идея заключалась в том, чтобы охватывать зону наиболее вероятных скольжений при потере возбуждения $0{,}1<S<10\%$.

Рис. 2.1,г демонстрирует возможность дальнейшего увеличения быстродействия за счет повышения пространственной селективности. Селективность обеспечивается областью, ограниченной поверхностями

AA′B′B, D′C′CD, B′E′C′CEB, A′F′D′DFA, B′E′C′D′A′, BECDFA.

Приведенный пример демонстрирует эволюционный путь изменения разделяющей поверхности в результате значительных затрат на математическое, физическое моделирование и натурные испытания. Однако, дальнейшие исследования показали, что увеличение размерности пространства резко усложняет задачу и требует разработки методов накопления данных и последующего формирования решающих правил. Эти процедуры по существу являются обучением при обосновании алгоритмов распознавания.

Коротко цель обучения можно сформулировать следующим образом – обосновать правило, в соответствии с которым по результатам полученных замеров построить или подкорректировать построенную поверхность, разделяющую разные классы. Прежде чем перейти к существу обсуждаемой проблемы, определим основные свойства, которым должен отвечать результат обучения.

Первое свойство, которое необходимо указать – это качество обучающего алгоритма. Казалось бы, в простейшей постановке можно было сформулировать следующий критерий – чем меньше ошибается система при оценке состояния, тем лучше организовано обучение. Однако, что такое «чем меньше»? Прежде всего, ошибки неизбежны, а полное отсутствие ошибок это лишь тот идеал, к которому целесообразно стремиться. В зависимости от конкретных условий возможны состояния, которые встречаются часто и уровень правильно различаемых ситуаций должен быть высок. Возможны состояния, которые случаются с оборудованием, но очень редко, здесь процент правильных распознаваний будет много меньше на том же отрезке времени несмотря на использование одинаковых алгоритмов. Тем не менее,

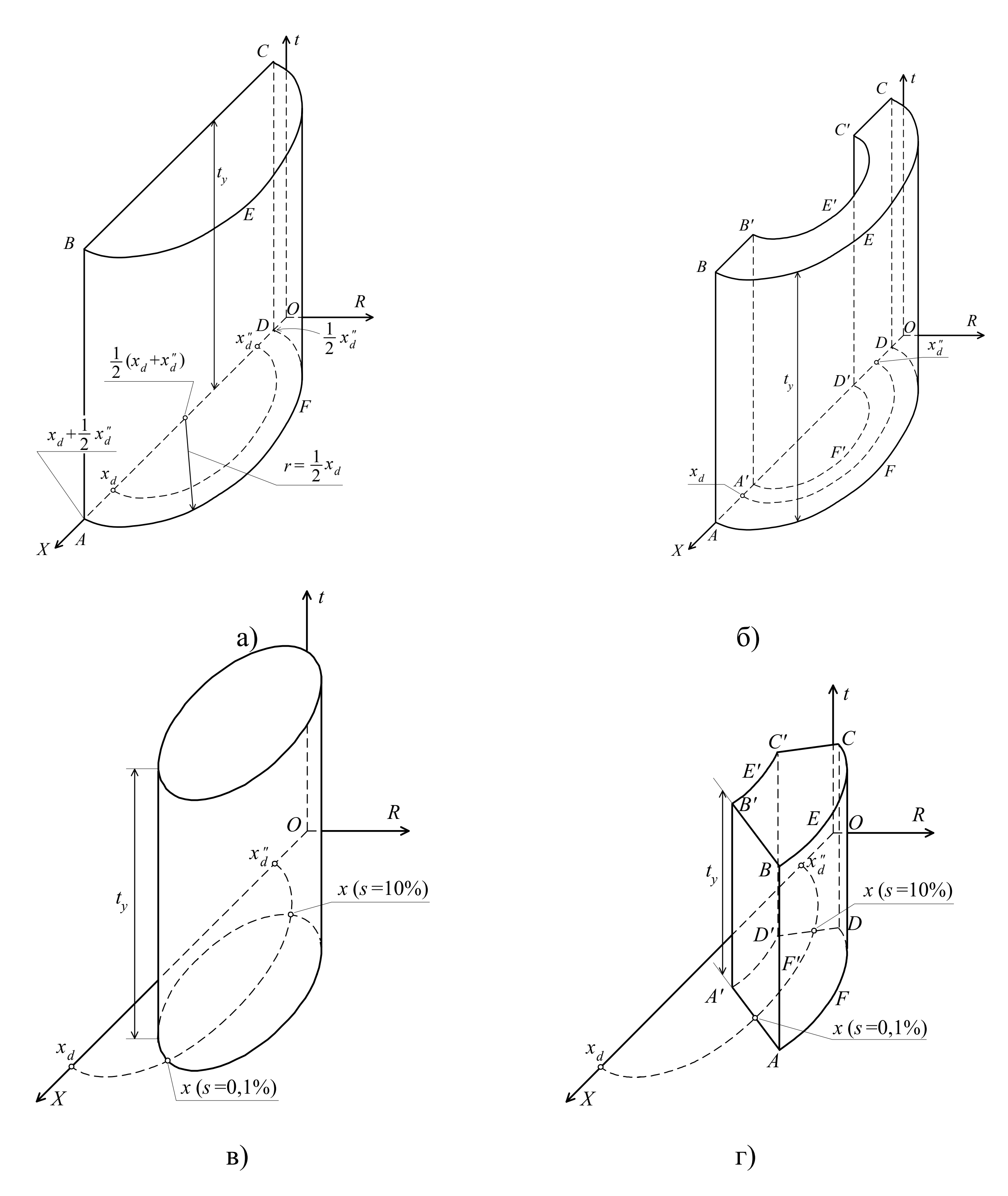


Рис. 2.1. Эволюция разделяющих поверхностей алгоритмов выявления асинхронного режима при потере возбуждения с охватом всего диапазона скольжения ротора

редко встречающееся состояние может оказаться гораздо более опасным по своим последствиям. Так конструктивно междуфазная изоляция генератора оказывается значительно прочнее витковой, однако, нарушение междуфазной изоляции, приводящее к короткому замыканию, не смотря на свою редкость приводит к значительно большему ущербу, чем витковые замыкания и зачастую влечет за собой системную аварию.

В соответствие каждому возможному состоянию установки поставим вероятность появления его среди состояний, подлежащих оценке. Пусть на множестве всех возможных состояний, характеризуемых вектором X, задана функция распределения вероятностей $P(x)$. Тогда «потери» от ошибки на ситуации x могут быть оценены величиной, пропорциональной вероятности появления этого состояния.

Следующее важнейшее свойство обучения является надежность. В подавляющем большинстве случаев существует одна возможность – выбирать обучающие варианты случайно, согласно тому распределению, при котором будет работать система оценки состояния. Другими словами будет иметь место случайная выборка из множества возможных состояний. Следовательно, учитывая случайный подбор элементов, обучающей последовательности уже нельзя требовать, чтобы обучение было безусловно успешным. Другими словами, успех в обучении может быть гарантирован не наверняка, а лишь с некоторой вероятностью.

Таким образом, результат обучения может быть оценен двумя свойствами:

- качеством полученного решающего правила – вероятностью неправильных ответов (чем меньше эта вероятность, тем выше качество);
- надежность получения решающего правила с заданным качеством – вероятностью получения заданного качества (чем выше эта вероятность,

тем выше надежность успешного обучения).

Задача сводится к созданию такого обучающего устройства, которое по обучающей последовательности строило бы решающее правило, качество которого с заданной надежностью было бы не ниже требуемого.

В самом простейшем подходе обучение- это задача выбора такого решающего правила, которое бы удовлетворяло определенным, наперед заданным требованиям. Целесообразно выделить два аспекта такого подхода:

– обоснование набора решающих правил для обучающегося устройства;
– определение методики выбора решающих правил.

Первое направление трудно поддается строгой математической трактовке и, как правило, несет эвристический характер. В рамках этого направления разработано огромное количество технических решений, которые положены в основу общей теории оценки состояния энергетического оборудования. Второе направление, напротив, легко формализуется, позволяет найти строгие решения. Но, несмотря на относительно простую формулируемость задачи, до сих пор не разработаны обобщенные правила выбора.

Попытаемся задачу обучения сформулировать математически. Пусть случайно и независимо появляются события (состояния) в среде, характеризующейся распределением вероятностей $P(x)$, причем мы имеем возможность в результате разборки оборудования ответить совершенно определенно к какому из классов относится это состояние. Предположим, что имеется (ради простоты) два класса. Мы имеем условную вероятность $P(\omega/x)$, где ω=1 если вектор x отнесен ко первому классу, и ω=0 если вектор x отнесен ко второму классу. Ни характера среды $P(x)$, ни правила классификации нам не известны. Однако известно, что обе функции существуют и существует совместное распределение вероятностей

$$P(\omega,x)=P(x)P(\omega/x).$$

Пусть определено множество Ω решающих правил $F(x,\alpha)$. В этом множестве правило задается конкретным значением вектора α. Все правила $F(x,\alpha)$ принимают только одно из значений нуль или единицу. Для каждого решающего правила должно быть определено качество $F(\alpha)$. На формальном языке качество $F(\alpha)$ функции $F(x)$ определяется так:

а) если пространство X дискретно и состоит из точек $x_1, x_2,\ldots, x_N$,

$$P(\alpha)=\sum_{\omega=0}^{1}\sum_{i=1}^{n}\left(\omega-F(x_i,\alpha)\right)^2 P(x_i)P(\omega/x_i),$$

где $P(x_i)$ – вероятность возникновения ситуации x_i;

б) в случае, когда в пространстве X существует плотность распределения $F(x)$

$$P(\alpha)=\sum_{\omega=0}^{1}\int\left(\omega-F(x,\alpha)\right)^2 P(x)P(\omega/x)dx;$$

в) в общем случае можно считать, что в пространстве X,ω задана вероятностная мера $P(x,\omega)$. При этом $P(\alpha)$ выражается так

$$P(\alpha)=\int_x\left(\omega-F(x,\alpha)\right)^2 dP(x,\omega).$$

Среди всех функций $F(x,\alpha)$, есть $F(x,\alpha_x)$, которая минимизирует вероятность ошибок. Эту-то наилучшую в классе функцию (или близкую к ней, т.е. функцию с качеством, отличным от $F(\alpha_0)$, не более, чем на малую величину ε и следует отыскать. Однако, поскольку совместное распределение

вероятностей $P(x,\omega)$ неизвестно, поиск ведется с использованием обучающей последовательности

$$x_1\omega_1, \ldots, x_\ell\omega_\ell ,$$

т.е. случайной и независимой выборки примеров фиксированной длины ℓ. В общем то нельзя найти алгоритм, который бы по конечной выборке безусловно гарантировал успех поиска. Успех можно гарантировать лишь с некоторой вероятностью 1-η.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы для любой функции $P(x,\omega)$ среди характеристических функций $F(x,\alpha)$ найти по обучающей последовательности фиксированной длины ℓ такую функцию $F(x,\alpha^*)$, о которой с надежностью не ниже 1-η можно было бы утверждать, что ее качество отличается от качества лучшей функции $F(x,\alpha_0)$ на величину, не превышающую ε.

Обобщим приведенные рассуждения. Требуется найти минимум по α функционала

$$R(\alpha) = \int \Theta(z,\alpha)dd(z). \tag{2.1}$$

Если не известна функция распределения $P(z)$, но зато дана случайная и независимая выборка x_1, … , $z_в$. То есть по существу задача сведена к минимизации среднего риска $\Theta(z,\alpha)$ для всякого фиксированного значения параметра α и определяет величину потерь при появлении сигнала z. Средняя по z величина потерь и определяется для фиксированного значения параметра в соответствии с (2.1). Задача заключается в том, чтобы выяснить, при каких значениях параметра α средняя величина потерь будет минимальной.

Наличие большого объема проблем оценки состояния энергетических

установок, которые решаются в условиях неопределенности, требуют адекватного методического обеспечения. Отправными являются следующие задачи:

1) операции не с отдельными числовыми значениями параметров состояния, а с множествами допустимых значений, пучками траекторий возмущенного движения, системных ограничений;

2) максимально возможный учет ограничений и многокритериальность в оценках множества состояний на основе ограничений предпочтения, адаптируемых к динамике процесса, что, конечно, недоступно отдельным лицам в процессе управления;

3) отображение текущих состояний на множество лингвистических переменных и реализация управлений или рекомендаций по управлению состояниями в форме, содержащей как числовые, так и лингвистические переменные;

4) разработка методов лингвистического описания процессов и их включение в практику оперативного управления энергосистемами, исследование и определение оптимального соотношения между множествами числовых и лингвистических переменных.

2.2. Формирование дискриминантных функций на основе нелинейных преобразований

В рассматриваемой части работы автор приводит комплекс решений, являющихся частью общей задачи формирования решающих правил. При оценке состояния энергетического оборудования решения явились основой для целого ряда устройств автоматического контроля получивших применение в энергетике.

Проведенные исследования в целом ряде работ показали, что использование определенного класса преобразований являются оптимальным по целому ряду соображений: простота деформации полученных разделяющих поверхностей, возможность на комбинированной основе получить сколь угодно сложную граничную линию, физическая реализуемость при построении конкретных устройств. Автор вынужден сузить класс анализируемых функций, причем в качестве критерия сужения принята наибольшая распространенность среди реализуемых устройств, имеющих наилучшие показатели.

Обобщенной функцией достаточно обширного класса преобразований принято так называемое синхронное детектирование.

В общем случае под синхронным детектированием понимается оператор

$$e(t) = k\, e_{П}(t) e_{K}(t),$$

где $e_{П}(t)$ – входной преобразуемый сигнал; $e_{K}(t)$ – периодический управляющий сигнал (вектор коммутации); k – постоянный коэффициент преобразования. Наибольшее распространение получило преобразование с вектором коммутации прямоугольной формы. Пусть в качестве преобразуемой величины на вход подается сигнал

$$e_1(t) = E_{m1} sin(\omega t + \varphi) ,$$

а в качестве управляющей

$$e_2(t) = E_{m2} sin\, \omega t ,$$

где φ – угол сдвига между входными сигналами. Величина $e_2(t)$ образует синхронный с ней прямоугольный вектор коммутации

$$e_k(t) = E_{m2}\, sign(sin\omega t)$$

Выходной сигнал в этом случае равен

$$e_k(t) = k\, E_{m1} sin(\omega t + \varphi) E_{m2}\, sign(sin\omega t)$$

где

$$sign\, x = \begin{cases} 1 \text{ при } x > 0 \\ 0 \text{ при } x = 0 \\ -1 \text{ при } x < 0 \end{cases}$$

Учитывая разложение в ряд Фурье сигнум-функции, получим

$$e(t) = \frac{2kE_{m1}E_{m2}}{\pi} \sum \frac{1}{2n+1} \{cos[2(n-1)\omega t + \varphi] - cos(2n\omega t + \varphi)\}$$

Приближенное значение выходного сигнала можно получить, ограничиваясь двумя первыми членами разложения

$$e(t) = \frac{2kE_{m1}E_{m2}}{\pi} \left[cos\,\varphi - \frac{2}{3} cos\,(2\omega t + \varphi) \right] .$$

Первое слагаемое при постоянных амплитудах пропорционально косинусу угла между $e_1(t)$ и $e_2(t)$. Выделение постоянной составляющей позволяет осуществить фазовое детектирование. Полученное выражение остается справедливым и при осуществлении преобразования с единичным вектором коммутации, при этом $E_{m2} = 1$.

Рассмотрим возможности преобразования при формировании дискретного сигнала “0” или “1” в зависимости от фазных и амплитудных соотношений e_1 и e_2.

Анализ показывает, что наиболее полным, с точки зрения получения различных граничных линий и наиболее простыми, с точки зрения сложности функционирования и технической реализации, являются следующие сочетания сравниваемых величин

$$k_i e_i(t)\, sign\, e_j(t) \quad \text{и} \quad k_j e_j(t)\, sign\, e_j(t) \qquad (2.3)$$

$$\left[k_i e_i(t) + k_{ij} e_j(t)\right] \cdot sign\left[k_i e_i(t) + k_{ij} e_j(t)\right] \quad \text{и} \quad k_j e_j(t) sign\, e_j(t), \qquad (2.4)$$

где k_i, k_j, k_{ij} – постоянные вещественные коэффициенты преобразования.

Учитывая возможность время–импульсного сравнения или сравнения постоянных составляющих соответствующих сочетаний (2.3), (2.4), были рассмотрены восемь вариантов алгоритмов функционирования. При время-импульсном сравнении сигнал логической единицы появляется в случае, когда мгновенное значение одного сигнала больше второго в течение времени $t>t_y$, где t_y уставка сравнивающего устройства. Переход двоичного сигнала из одного состояния в другое при сравнении постоянных составляющих, определяется знаком этой постоянной составляющей результирующего сигнала.

Первые два варианта алгоритмов выполняют последовательность операций, при сочетании сравниваемых величин (2.3).

Сигналы e'_1 и e'_2 показаны на временной диаграмме (рис.2.2,а) условно одного знака для удобства анализа характеристик. Угол γ представляет текущее значение угла, при котором $e'_1 > e'_2$. Исходной зависимостью, определяющей уравнение срабатывания, является выражение, записанное для точки γ_1

$$k_1 E_{m1} \sin\gamma_1 = k_2 E_{m2} \sin(\pi + \gamma_1 + \varphi)$$

где E_{m1} и E_{m2} – амплитудные значения синусоидальных величин $e_1(t)$ и $e_2(t)$.

Для фиксированного значения $\gamma = \gamma_y$ = const, а следовательно, для $\gamma_1 = \pi - \gamma_y$ = const, получим уравнение граничной линии

$$W + k_1 / k_2 \cos\varphi + k\, k_1 / k_2 \sin\varphi = 0\ ,$$

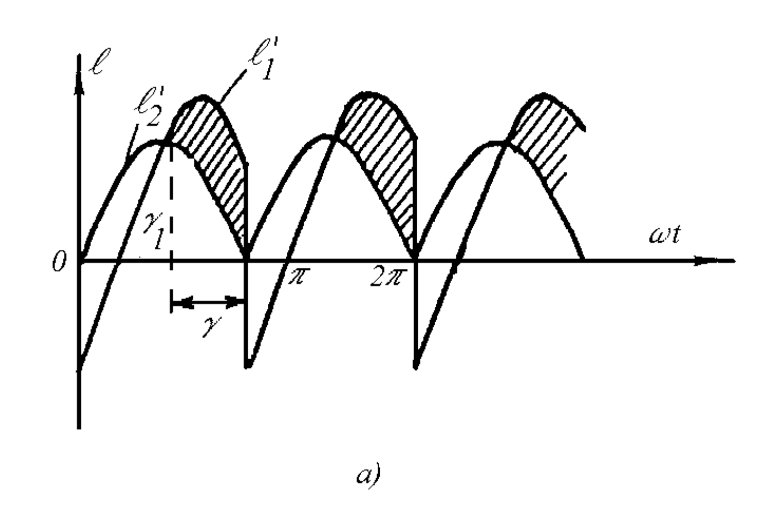
где $\dot{W} = W \exp(j\varphi) = E_{m2} / E_{m1} \exp(j\varphi)$.

Выражение представляет собой уравнение окружности, проходящей через начало координат, параметры которой соответственно равны

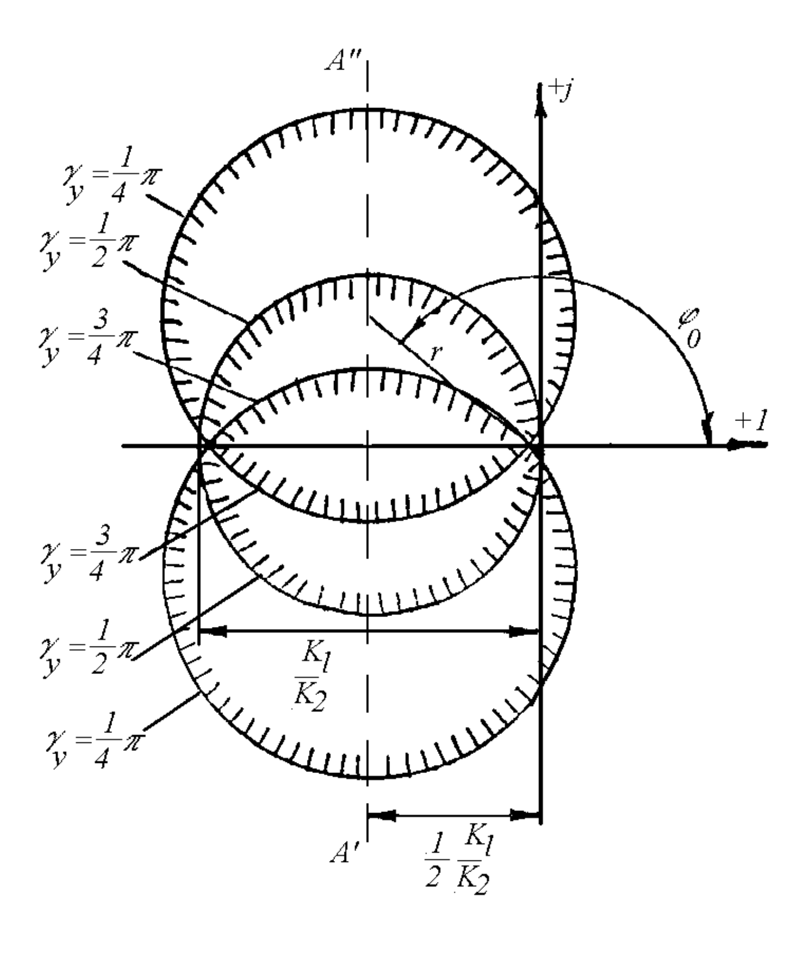
$$r = k_1 / k_2 (1/4 + k^2/4)^{1/2},$$

$$\varphi_o = \pm\, \gamma_y\ ,$$

где r и φ_o – соответственно радиус и угол между прямой, соединяющей начало координат с центром окружности и положительным направлением действительной оси; $k = ctg(\pi - \gamma_y)$, $\varphi_o = -\gamma_y$ при $\varphi = 0 \div \pi$; $k = ctg\ \gamma_y$, $\varphi_o = \gamma_y$ при $\varphi = \pi \div 2\pi$.



а)



б)

Рис. 2.2. Алгоритмы преобразования с граничной линией в виде дуг окружностей, фиксированных относительно начала координат

а) – временные диаграммы;

б) – граничная линия

На рис.2.2,б в показаны граничные линии для различных значений уставки по углу при положительных значениях k_1 и k_2. Для отрицательных значений k_1 и k_2 характеристика представляет совокупность точек, лежащих вне области, ограниченной дугами окружностей. В обоих случаях изменение знака коэффициента k_1 приводит к зеркальному отображению характеристик в правой полуплоскости. Степень сжатости характеристики может характеризоваться отношением осей симметрии

$$\frac{a}{в} = \frac{1}{k + \sqrt{1 + k^2}} ,$$

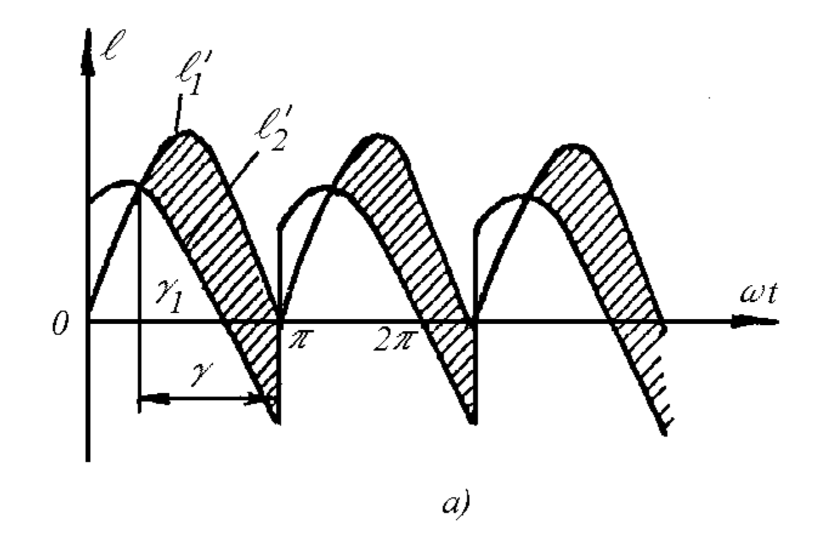
где a – ось симметрии заключенная между вершинами характеристики; $в$ – ось симметрии по прямой A′A″, отстоящей от начала координат на расстоянии $k_1 /2\ k_2$.

Если в основу положено соотношение постоянных составляющих сигналов. Учитывая разложение в ряд каждого из периодических сигналов $e_1(t)$ и $e_2(t)$ и приравнивая постоянные составляющие, получим граничную линию области срабатывания

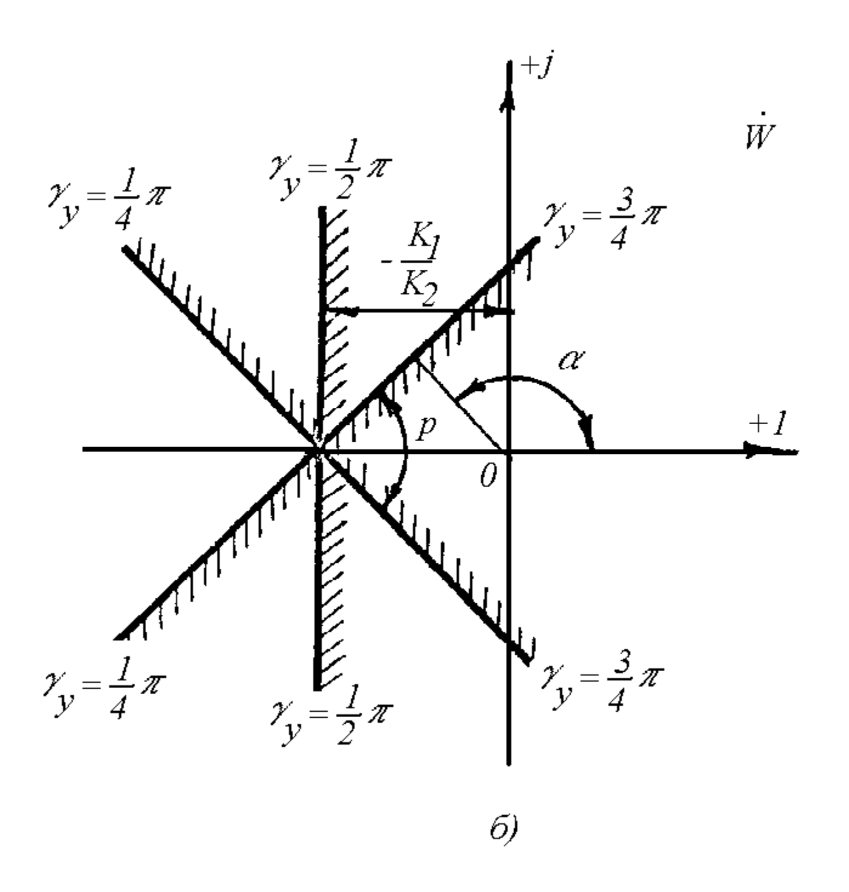
$$W - \frac{k_1}{k_2} \cos\varphi = 0 \ .$$

Уравнение справедливо во всей плоскости $\dot{W}$ и представляет собой окружность, проходящую через начало координат, радиусом, равным $k_1 / 2k_2$, и центром, лежащим на действительной оси. Граничная линия совпадает с вариантом I при $\gamma_y = \pi / 2$.

Следующие два варианта иллюстрируются рис.2.3. В отличие от предыдущих алгоритмов здесь сигнал $e_2(t)$ перемножается с вектором



а)



б)

Рис.2.3. Алгоритмы преобразования с граничной линией в виде прямых с фиксированным положением относительно начала координат

а) – временные диаграммы;

б) – граничная линия

коммутации, совпадающим по фазе и синхронным с $e_1(t)$. Исходным выражением, определяющим граничную линию, является равенство, записанное для точки γ_1 (рис.2.3,а).

$$k_1 E_{m1} \sin\gamma_1 = k_2 E_{m2} \sin(\pi + \gamma_1 + \varphi) \ .$$

Для фиксированного выражения $\gamma = \gamma_y$ получим уравнение граничной линии

$$W = \frac{k_1}{k_2} \frac{\sin\gamma_1}{-\sin\gamma_1\cos\varphi - \sin\varphi\cos\gamma_1} \ .$$

Выражение представляет собой прямую, параметры которой равны

$$p = \frac{k_1}{k_2}\sin\gamma_y ,$$

$$\alpha = \pm\gamma_y ,$$

где p – расстояние от начала координат до прямой; α – угол между полярной осью и перпендикуляром из начала координат на прямую; $\alpha = +\gamma_y$ при $\varphi = 0 \div \pi$, $\alpha = -\gamma_y$ при $\varphi = \pi \div 2\pi$. В соответствии с полученными зависимостями характеристиками являются прямые, исходящие из одной точки и симметричные относительно действительной оси (рис.2.3,б). Угол между прямыми зависит от значения уставки

$$\alpha_1 = 2(\pi - \gamma_y).$$

Характеристики по рис.2.3,б, полученные при положительных коэффициентах масштабного преобразования k_1 и k_2, могут быть легко преобразованы при любом другом знаке этих коэффициентов.

Алгоритм преобразования по следующему варианту предполагает контроль знака результата сравнения постоянных составляющих e'_1 и e'_2. Воспользовавшись разложением в ряд сравниваемых периодических сигналов, получим уравнение срабатывания

$$W = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} \ ,$$

которое представляет собой уравнение прямой, перпендикулярной к действительной оси и отстоящей от начала координат на расстоянии k_1 / k_2 и совпадает с характеристикой варианта при $\gamma_y = \pi / 2$.

Следующие варианты выполнены при сочетании сравниваемых величин (2.4).

Анализ характеристик проведем в два этапа. На первом этапе рассмотрим характеристику в плоскости $\dot{W}' = \dot{E}''_2 / \dot{E}'_1$, где $\dot{E}''_2$ является суммой $\dot{E}'_2 = k_{12}\dot{E}_1 + k_2\dot{E}_2$, а $\dot{E}'_1 = k_1\dot{E}_1$. Тогда связь плоскостей $\dot{W}'$ и $\dot{W}$ запишется в виде

$$\dot{W}' = \frac{k_2}{k_1}\dot{W} + \frac{k_{12}}{k_1} .$$

Полученное выражение представляет собой линейную связь плоскостей $\dot{W}'$ и $\dot{W}$, с помощью которой возможно конформное отображение плоскости $\dot{W}'$ на плоскость $\dot{W}$.

Выражениями, определяющими характеристику срабатывания в плоскости W', являются равенства, записанные для точек γ_2 и γ_1 временных диаграмм, изображенных на рис.2.4,а.

$$E'_{m1} \sin\gamma_1 = E''_{m2} \sin(\varphi' + \gamma_1)$$
$$E'_{m1} \sin\gamma_2 = E''_{m2} \sin(\varphi' + \gamma_2 + \pi),$$

где E'_{m2}, φ' – амплитуда и фаза электрической величины, равной сумме синусоидальных электрических величин $e_1(t)$ и $e_2(t)$; E'_{m1} – амплитуда электрической величины $k_1 e_1(t)$. Учитывая, что $\gamma_2 = \gamma_1 + \gamma_y$, найдем уравнение граничной линии в плоскости $\dot{W}'$

$$(W')^2 \pm 2kW' \sin\varphi' - 1 = 0,$$

что представляет собой уравнение окружности, параметры которой равны

$$\rho_o = k, \qquad r = \sqrt{k^2 + 1},$$

где ρ_o и r – расстояние до центра окружности и радиус. Знак “+” в уравнении срабатывания и $k = ctg\gamma_y$ соответствуют дуге, ограничивающей область срабатывания в верхней полуплоскости, а знак “-” и $k = ctg(\pi - \gamma_y)$ в нижней полуплоскости. Характеристиками срабатывания являются дуги окружностей, симметрично расположенные в верхней и нижней полуплоскостях с центрамти, расположенными на мнимой оси $\dot{W}'$ и проходящих через точки “+I ” и
“-I ” действительной оси. Воспользовавшись правилами конформного отображения, получим семейство характеристик в плоскости $\dot{W}$. На рис.2.4,б это семейство показано для случая $k_{21} > k_1$. Меняя соотношение коэффициентов и их знаки, можно получить характеристики, произвольно расположенные в плоскости $\dot{W}$.

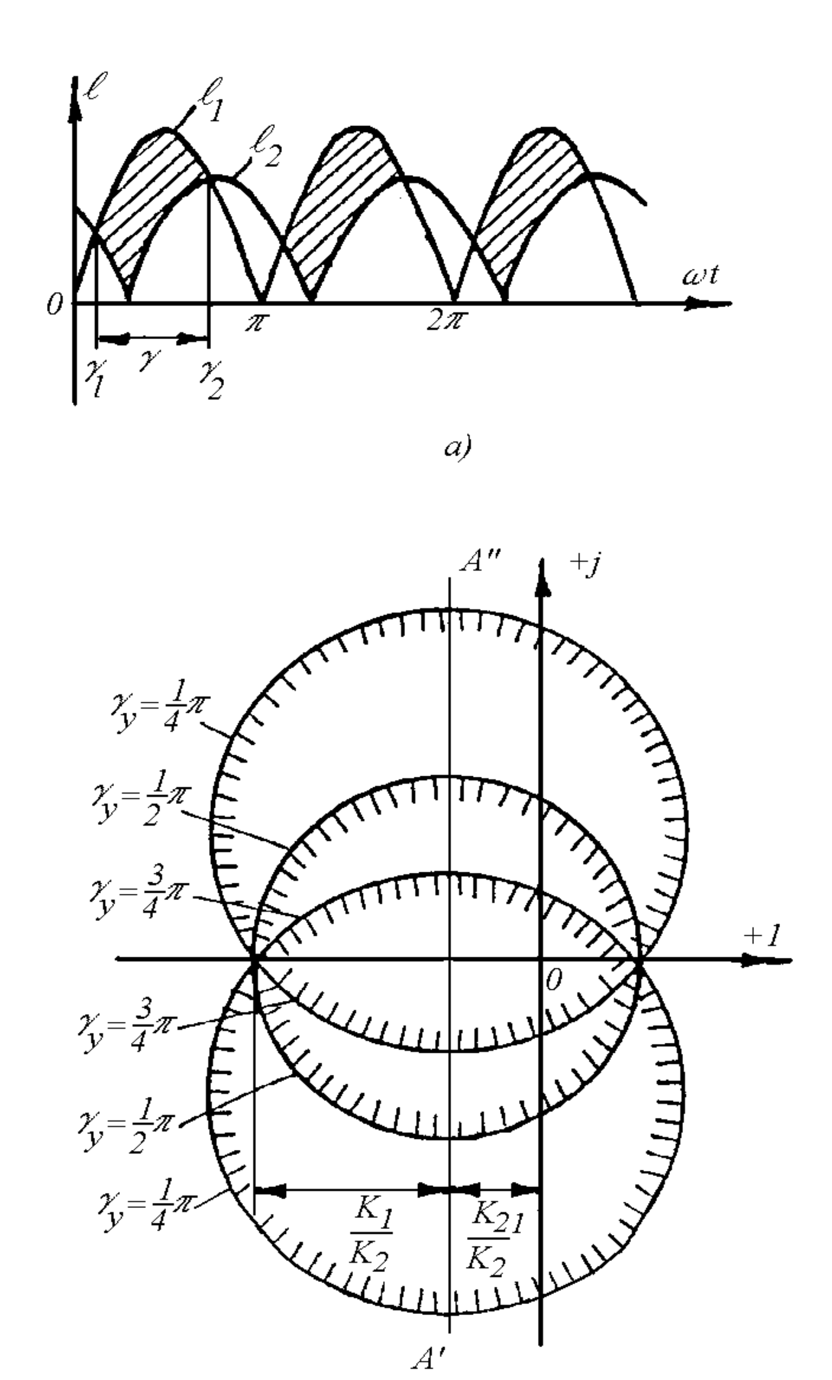


Рис. 2.4. Алгоритм преобразования с граничной линией в виде дуг окружностей с произвольным расположением относительно начала координат

а) – временные диаграммы;

б) – граничная линия

Характеристики при сравнении постоянных составляющих e'_1 и e'_2.могут быть получены также в два этапа и в конечном итоге определяются уравнением

$$W^2 + 2\frac{k_{21}}{k_2}W\cos\varphi + \left(\frac{k_{21}}{k_2}\right)^2 = \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2.$$

Выражение соответствует уравнению окружности в полярных координатах, центр которой лежит на действительной оси плоскости $\dot{W}$ и имеет радиус и расстояние до центра, равные

$$\rho_o = \frac{k_{21}}{k_2}, \quad r = \frac{k_1}{k_2},$$

что представляет частный случай при $\gamma_y = \pi / 2$.

Совокупность операций следующих двух вариантов иллюстрируется рис. 2.5. На первом этапе характеристика срабатывания определяется равенствами, записанными для точек γ_2 и γ_1 (рис. 2.5,а)

$$E'_{m1}\sin(\gamma_1 + \varphi') = E'_{m2}\sin\gamma_1$$
$$E'_{m1}\sin(\gamma_2 + \varphi') = E'_{m2}\sin(\pi - \gamma_2).$$

Уравнение срабатывания в этом случае принимает вид

$$(W')^2 \pm 2kW'\sin\varphi' - 1 = 0$$

Учитывая, что $\dot{E}'_1 = k_{12} + k_1\dot{E}'_1$, $\dot{E}'_2 = k_2E_2$, связь плоскостей $\dot{W}$ и $\dot{W}'$ определяется соотношением

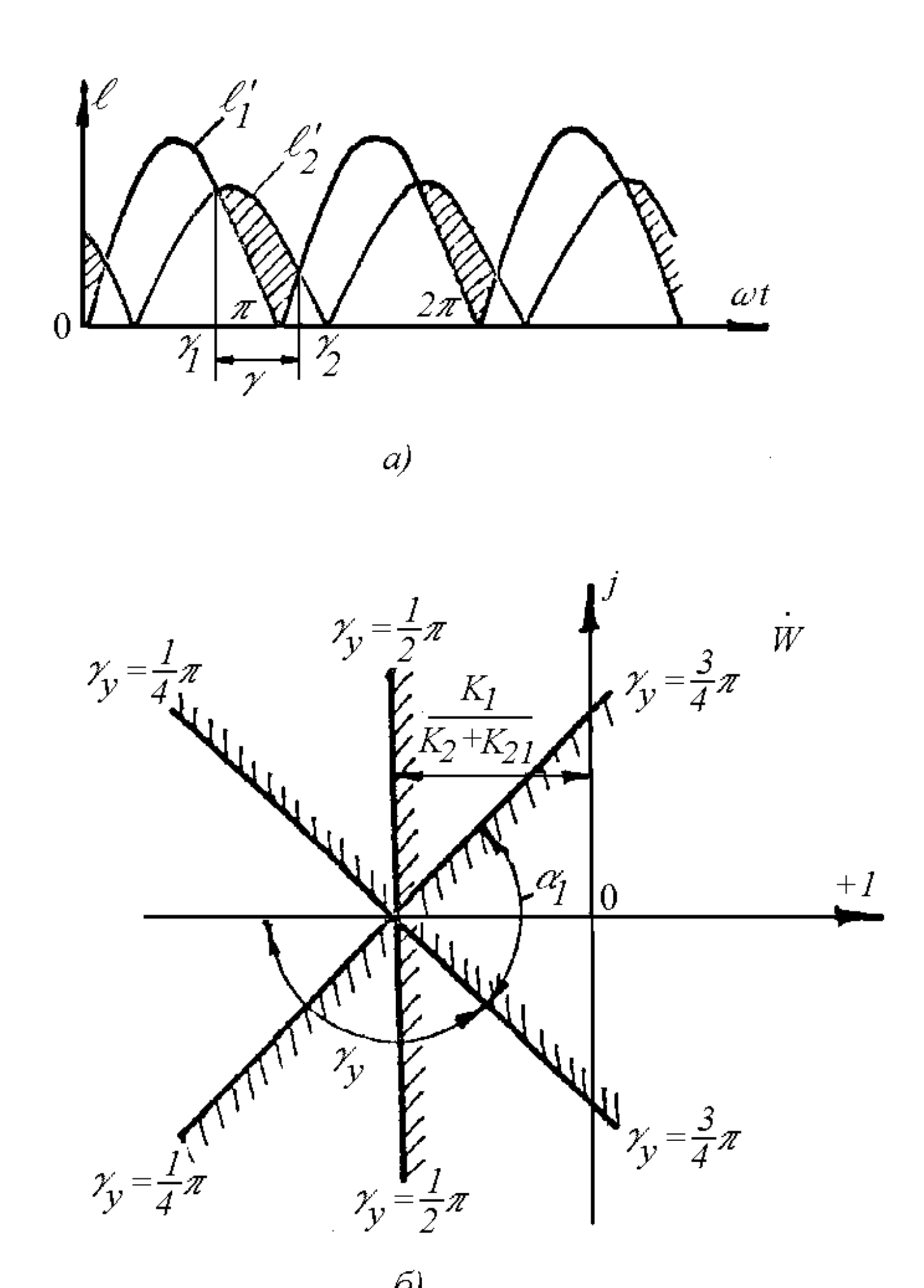


Рис. 2.5. Алгоритм преобразования с граничной линией в виде прямых произвольно расположенных по отношению к началу координат

а) – временные диаграммы;

б) – граничные линии

$$\dot{W}' = \left(\frac{k_{12}}{k_2} + \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{\dot{W}} \right)^{-1}.$$

В соответствии с правилами конформного отображения, дуги окружности в плоскости $\dot{W}'$ отображаются в прямые в плоскости $\dot{W}$. При этом точка $\dot{W}' = k_2 \cdot k_{12}^{-1}$ переходит в точку $\dot{W} = 0$, а точка $\dot{W}' = -1$ – в точку $W = -k_1(k_2 + k_{21})^{-1}$. Семейство граничных линий в плоскости $\dot{W}$ представляет собой прямые, симметрично расположенные в верхней и нижней полуплоскостях, исходящие из точки, расположенной на действительной оси на расстоянии $k_1(k_2 + k_{21})^{-1}$ от начала координат. Угол между лучами равен $\alpha_1 = 2(\pi - \gamma_y)$. При сравнении постоянных составляющих e'_1 и e'_2 граничная линия представляет собой прямую, перпендикулярную действительной оси.

2.3. Анализ проблем обучения автоматизированных систем оценки состояния.

Представим процедуру обучения в виде некоей системы S с двумя множествами вида X и Z: $X(X_1, X_2, ...X_n)$ – параметрический вектор, учитывающий, например, структуру, геометрию, режим и т.д.; $Z(Z_1, Z_2, ...Z_m)$- вектор неуправляемых переменных. Множество выходных характеристик объекта Y представляется вектором оценок критериальных свойств. В общем случае $Y=f(X, Z)$.

Учет запаздывания системы информационного обеспечения состояния системы будет описываться векторами $X(t_1)$ и $Y(t_2)$, где t_1 предшествует моменту t_2, а момент T_1 – моменту T_2 (рис.2.9). Состояние системы после реализации вектора операции $A(t, T)$ будет описываться векторами $X(T_1)$ *и* $Y(T_2)$. Вектор операции $A(t, T)$ состоит из отдельных действий $a(x_j, t_\ell)$, где t_ℓ – момент времени на отрезке (t, T); j – индекс управляемой переменной и описывает один из возможных способов управления объектом.

Об удачности операции управления по способу $A_k(t, T)$, где k – идентификатор операции, можно судить сравнивая векторы $Y(t_2)$ *и* $Y(T_2)$ по их составляющим. Об эффективности операции $A_k(t, T)$ относительно операции $A_m(t,T)$ можно судить, сравнивая составляющие векторов $Y\left[A_k(t,T),\overline{Z}\right]=Y_k(T_2)$ и $Y\left[A_m(t,T),Z\right]=Y_m(T_2)$.

Векторы $Y(t_2)$, $Y_k(T_2)$, $Y_m(T_2)$ описывают качество решающего правила до начала и после окончания реализации правила. Ситуация в результате применения решающего правила может стать хуже или лучше, причем приемлемость операции записывается в виде функционала

$$E*\left[Y(t_2)\right]<E*\left[Y(T_2)\right],$$

а условие выбора решающего правила из двух –

$$E*[Y_k(T_2)] < E*[Y_m(T_2)] \text{ при } E*[Y_k(T_2)] - E*[Y_m(T_2)] > 2\sigma(E*),$$

где $\sigma(E*)$ - среднеквадратичная погрешность в оценке целевой функции $E*$.

Исследование задач выбора решающих правил показали, что чаще всего ситуация такова, что задан определенный класс решающих правил S и рассчитывают на задачи, для которых в этом классе есть «достаточно хорошие» разделяющие правила. Пусть априорные сведения о природе задач, на которые рассчитывается алгоритм обучения, задаются как априорная вероятность тех или иных задач. В этом случае удобен метод построения алгоритма обучения на базе минимизации критерия Байеса

$$R_Б(A) = \sum_T P_{апр}(T) \cdot R_\ell(A,T).$$

Оптимальную по критерию Байеса процедуру обучения реализует следующая схема.

1. Пусть задана обучающая последовательность x_1, ω_1; …; x_ℓ, ω_ℓ.По этой последовательности для каждой задачи T вычисляется апостериорная вероятность $P_{апост}(T)$ того, что алгоритм столкнулся именно с этой задачей:

$$P_{апост}(T) = \left[P_{апр}(T) \prod_{i=1}^{\ell} P_T(x_i, \omega_i) \right] \left[\sum_T P_{апр}(T) \prod_{i=1}^{\ell} P_T(x_i, \omega_i) \right]^{-1},$$

где $P_{апр}(T)$ – априорная вероятность задачи T; $T_T(x,\omega)$ – распределение, соответствующее задаче T.

2. Для каждой ситуации х вычисляется апостореорная вероятность того, что она будет отнесена к классу ω.

$$P_{апост}(\omega / x) = \sum_T P_T(\omega / x) P_{апост}(T).$$

3. Наконец строится решающее правило $F(x)$, работающее следующим образом:

$$F(x)=\begin{cases}1, & \text{если } P_{апост}(1/x)\geq 0{,}5\\ 0, & \text{если } P_{апост}(1/x)<0{,}5\end{cases}$$

Перечисленные шаги обучения несмотря на свою привлекательность своими очевидными процедурами могут быть реализованы в исключительно простейших случаях. Во-первых, в задачах оценки состояния выбираемое решаемое правило существенно зависит от априорных сведений. Так автором показано [40, 44]., что указанное обстоятельство обеспечивает успешное использование критерия Байеса только для очень узкого круга задач. Показано, что стратегия Байеса эффективна только в том случае, если априорные вероятности таковы, что огромное большинство состояний было в совокупности маловероятно, а ничтожное меньшинство состояний образовывало бы множество, вероятность которого близка к единице.

Действительно, пусть Q – множество всех возможных решающих правил. Выделим систему вложенных множеств

$$Q_1 \subset Q_2 \subset \ldots \subset Q_N \subset \mathrm{Q}, \quad (2.2)$$

такую, что вероятность $P(Q_i)$ встретить задачу из Q_i образует систему неравенств

$$P(Q_1) < P(Q_2) < \ldots < P(Q_N) < 1.$$

То есть при переходе от Q_i к Q_{i+1} количество задач резко возрастает, в то время как величины

$$\Delta P_i = P(Q_{i+1}) - P(Q_1)$$

монотонно уменьшаются. Система вложенных множеств и вероятностей составляют в условиях применения критерия Байеса априорные сведения, которые как правило в большинстве практических задач оценки состояния определить весьма проблематично.

Рассмотрим возможности совершенствования алгоритмов обучения, отталкиваясь от рассмотренного критерия. Предполагая, что мы имеем только априорно известное множество (2.2) построим стратегию исходя из условия, что ΔP_i уменьшается. В обучающей последовательности

применяется сначала алгоритм, рассчитанный на задачи из класса Q_1. Только в том случае, если он дает неудовлетворительные результаты, применяется алгоритм, рассчитанный на задачи из класса Q_2 и т.д.

Приведем детальное описание процедуры последовательного обучения. В классе решающих правил S вводится упорядочение, т.е. строится система вложенных множеств

$$S_1 \subset S_2 \subset \ldots \subset S_N = S.$$

Затем в классе S_1 имеется правило минимизирующее эмпирический риск. Если найденное решающее правило оценивается как неудовлетворительное, то имеется правило, минимизирующее эмпирический риск в классе S_2. Процедура поиска завершается, когда будет найдено удовлетворительное решающее правило.

Предлагаемую методику целесообразно рассматривать как двухуровневую процедуру обучения. На первом уровне и обучающей последовательности применяется N алгоритмов $A_1,\ldots, A_N$, каждый из которых выбирает решающее правило, минимизирующее эмпирический риск в классах S_i. На втором уровне из N отобранных решающих правил выбирается то, которое минимизирует заданный выбор.

Для реализации методики необходимо найти:

- критерий выбора решающего правила;
- как вводить упорядочение класса решающих правил S.

Обоснование критерия выбора решающего правила тесно связано с функцией роста. Опуская математическое обоснование вопросов, связанных с функцией роста, изложенных в большом числе литературных источников, отметим лишь его смысл – оно равно максимальному числу способов разбиения на два класса с помощью решающих правил $F(x, \alpha)$. Идея связана с использованием оценки качества

$$P(i) \le P_{эмп}(i) + 2\sqrt{\frac{n_i(\ln 2\ell - \ln n_i + 1) - \ln \eta / 5}{\ell - 1}},$$

где $P_{эмп}(i)$ – величина минимума эмпирического риска в классе S_i; n_i –

показатель емкости S_i; ℓ - длина обучающей выборки.
Величина

$$\varepsilon(i) = 2\sqrt{\frac{n_i(\ln 2\ell - \ln n_i + 1) - \ln \eta / 5}{\ell - 1}}$$

задает доверительный интервал для класса S_i и монотонно растет с номером i. Напротив, величина $P_{эмп}(i)$ не возрастает с ростом i, поскольку эмпирически оптимальное правило из S_i содержится во всех $S_j (j>i)$. В качестве критерия выбора может быть взята правая часть оценки, т.е.

$$K(\alpha) = P_{эмп}(\alpha) + 2\sqrt{\frac{n_i(\ln 2\ell - \ln n_i + 1) - \ln \eta / 5}{\ell - 1}}.$$

Правило минимизирующее приведенное выражение, обеспечивает минимальную гарантированную величину вероятности ошибочной классификации.

В классе линейных решающих правил возможно существенное упрощение упорядочения. Рассмотрим класс линейных решающих правил

$$F(x, \lambda) = \Theta\left(\sum_{i=1}^{m} \lambda_i \varphi_i(x)\right)$$

Расположим признаки $\varphi_i(x)$ в порядке уменьшения априорной вероятности того, что этот признак понадобится при классификации. Упорядоченная система линейных решающих правил строится так: в класс S_1 попадут решающие правила, где все λ_i=0, за исключением λ_1, в классе S_2 – такие, что только λ_1 и λ_2 могут быть отличны от нуля и т.д. В первый класс попадают решающие правила, которые при распознавании используют только первый признак, во второй класс те, что используют только первый и второй признаки и т.д. Показатель емкости каждого из этих классов равен m+1, где m - число используемых признаков.

Процедура высшего уровня в алгоритме упорядоченной минимизации риска в данном случае будет выбирать решающее правило, минимизирующее критерий.

$$K(m) = P_{эмп}(\alpha_m) + 2\sqrt{\frac{(m+1)(\ln 2\ell - \ln(m+1)+1) - \ln\eta/5}{\ell - 1}}$$

Следующим шагом в направлении совершенствования процедуры по критерию Байеса является подход, основанный на построении решающего правила не по всей выборке, а лишь по выборке, попадающей в окрестность дискриминируемой точки. Упорядочим элементы обучающей последовательности по близости к элементу x. Затем последовательно рассмотрим ℓ экстремальных гиперплоскостей, разделяющих соответственно $1,2,...,\ell$ элементов упорядоченной обучающей последовательности. Проведем анализ задачи в детерминистской постановке. Пусть дана обучающая выборка x_1, x_2, …, x_ℓ. Алгоритмы первого уровня, используя упорядоченный поиск, выберут каждый в своем классе S_i из числа безошибочных решающих правил правило $F(x,\alpha)$. В качестве критерия выбора примем величину доверительного интервала

$$\varepsilon = 2\frac{d(E_i)(\ln 2\ell - \ln d(E_i) + 1) - \ln\eta/2}{\ell},$$

где $\alpha(E_i) = \min\left(\frac{D(E_i)}{4\rho(E_i)} + 2, i+1\right).$

Здесь как величина $D(E_i)$, так и $\rho(E_i)$ зависят от подпространства E_i, поскольку и расстояние между выпуклыми оболочками классов заменяются при проектировании в подпространство.

При стохастическом варианте задачи критерием выбора будет зависимость

$$K(i) = 2\frac{d_i\left(\ln\frac{2\ell}{d_i} + 1\right) - \ln\frac{\eta}{24}}{\ell}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4P_{эмп}(i)\ell}{d_i\left(\ln\frac{2\ell}{d_i} + 1\right) - \ln\frac{\eta}{24}}}\right) + P_{эмп}(i).$$

Вектор x отклоняется к тому классу, к которому его относит гиперплоскость с наилучшей оценкой качества.

Рассмотрим реализацию процедуры обучения через деформацию признакового пространства. Пусть обучающая последовательность представляет собой несколько множеств. Из множества признаков алгоритм выделяет так называемые достаточные признаки. Достаточным признаком для векторов первого класса называется признак, который на всех векторах второго класса принимает значение 0. Аналогично определяются достаточные признаки других обучающих показов.

Процедура реализации методики может быть представлена в виде следующей последовательности.

Представим множество первичных признаков в виде таблицы 2.1. Строкам этой таблицы представим в соответствие - классы состояний $E_i \in E$, а столбцам - замеры признаков $\pi \in \Pi$, где $\Pi = \{\pi\}_{i=1}^{\ell}$ - множество замеров, ℓ - число признаков. Суммарную стоимость временных и материальных затрат на определение признаков π_j назовем ценой и обозначим $C(\pi_j)$, Дополним построенную таблицу строкой, состоящей из значений $C(\pi_j)$.

Таблица 2.1 называется исходным описанием классов распознаваемых состояний диагностируемого объекта. Она представляет собой математическую модель распознаваемого объекта, устанавливавшую связь между множеством классов состояний E и множеством замеров Π. По результатам измерений контролируемых параметров формируется изображение распознаваемого состояния в виде вектора Состояние относится к тому классу, которому соответствует строка таблицы, имеющая наибольшее сходство с изображением.

Очевидно, что результаты распознавания будут тем лучше, чем больше разница между элементами разных строк табл. 2.1, т. е. между признаками e_{ij} и e_{kj}; $i,k=1, 2, \ldots, M, i \neq k$; $j=1, 2, \ldots, \ell$. Но признак e_{ij} есть наиболее вероятный

Таблица 2.1.

Исходное описание распознаваемых состояний

Реализация / Состояния	π_1	π_2	…	π_j	…	π_ℓ
e_1	e_{11}	e_{12}	–	e_{1j}	–	$e_{1\ell}$
e_2	e_{21}	e_{22}	–	e_{2j}	–	$e_{2\ell}$
–	–	–	–	–	–	–
e_i	e_{i1}	e_{i2}	–	e_{ij}	–	$e_{i\ell}$
–	–	–	–	–	–	–
e_m	e_{m1}	e_{m2}	–	e_{mj}	–	$e_{m\ell}$
Цена реализации	С(π_1)	С(π_2)	–	С(π_j)	–	С(π_ℓ)

исход замера π_j при условии, что состояние объекта $E \in E_i$. Таким образом, не все контролируемые параметры одинаково важны при распознавании. Если π_j дает одинаковые результаты при состояниях объекта, принадлежащих разным классам, то этот замер бесполезен при распознавании, так как он не несет информации о различимости. Если результаты проверки для разных классов состояний будут сильно отличаться друг от друга, то такая проверка обладает высокой информативностью при распознавании состояний объекта.

В основу метода положено построение матрицы различимости, содержащей бинарные элементы:

$$\gamma = \begin{cases} 1, \text{если } \left| e_{qj} - e_{fj} \right| < \delta \\ 0, \text{если } \left| e_{qj} - e_{fj} \right| \geq \delta \end{cases},$$

$$1 \leq q < f \leq M; \quad j = 1, 2, \ldots, \ell.$$

где q и f – номера классов, в которых сравнивается признак e_j и δ – некоторое пороговое значение. Матрица R строится из элементов r, количество которых определяется всеми возможными парами:

$$R = \begin{Vmatrix} r_{11}\, r_{12} \ldots r_{1\ell} \\ r_{21}\, r_{22} \ldots r_{2\ell} \\ r_{k1}\, r_{k2} \ldots r_{k\ell} \end{Vmatrix} \qquad (2.6)$$

Число столбцов матрицы R равно исходному числу признаков, а число строк определяется формулой

$$k = \frac{M(M-1)}{2}$$

Выбор признаков осуществляется путем преобразований функций алгебры логики, полученной на основании матрицы различимости. Функция формируется в конъюнктивной нормальной форме

$$L = \prod_k \Big(\sum_{e_j \in G_h} e_j \Big),\ k = 1,2,\ldots,M \qquad (2.7)$$

где $G_h = (e_j / r_{hj} = 1)$ – множество столбцов матрицы различности (2.6), имеющих на пересечении с h – й строкой единицы.

Функция (2.7) может быть упрощена, если учесть известное соотношение

$$e_j(e_i + e_j) = e_j \qquad (2.8)$$

в соответствии с которым множество G_h, содержащее в себе некоторые другие подмножества G_ν $(h,\ \nu \in 1, M;\ h \neq \nu)$ можно не учитывать.

Полученная с учетом упрощения по правилу (2.8) логическая функция (2.7) преобразовывается в равносильную дизъюнктивную нормальную форму путем логического перемножения между собой отдельных дизъюнкций функции (2.7), причем в процессе преобразования осуществляется дальнейшее упрощение. Полученная в конечном итоге логическая функция имеет следующий вид:

$$L = \sum_{G \to G_T \in G} \left(\prod_{e_j \in G} e_j \right) \tag{2.9}$$

где G_T – тупиковое покрытие, G – все множество тупиковых покрытий. Под тупиковым понимается такое покрытие, любое подмножество которого не обеспечивает различимости.

Из множества тупиковых покрытий выбирают такие, которые позволяют использовать минимальное число признаков. Таких покрытий может быть несколько. Чтобы выбрать одно из них, можно подсчитать затраты, связанные с реализацией каждой из этих совокупностей

$$C = \sum_{e_j \in G_{min}} C(e_j)$$

и выбрать из них ту, для которой эти затраты минимальны, где G_{min} – минимальное из тупиковых покрытий.

В ряде случаев выбор из общего числа признаков определенной совокупности целесообразно осуществить, исходя из наибольшей

информативности. Исходная неопределенность объекта характеризуется энтропией

$$H = -\sum_{E_i \in E} P(E_i) log_2 P(E_i)$$

где $P(E_i)$ – вероятность i – го класса состояния объекта. Тогда информация, полученная при использовании конкретного признака, равна

$$I(e_j) = H - H(e_j) \qquad (2.10)$$

где $H(e_j)$ – энтропия состояния объекта после определения признака.
Если учесть, что энтропия определяется по всем ее исходам, то

$$H(e_j) = \sum_{r=1}^{f_j} P(e_j^r),$$

$$P(e_j^r) = \sum_{E_j \in E_i^r} P(E_j),$$

$$H(e_j^r) = \left\{ - \sum_{E_j \in E_i^r} P(E_j)[\sum_{E_k \in E_i^r} P(E_k)]^{-1} \right\} \left\{ log_2 P(E_j)[\sum_{E_k \in E_i^r} P(E_k)] \right\},$$

где $P\ (e_j^r)$ – вероятность r – го исхода при определении признаков; $H\ (e_j^r)$ – энтропия состояния оборудования после определения признака; f_j – число исходов признака e_j; E_j^r – множество классов, в которых определение признака e_j дает одинаковый результат; e_j^r – r – й исход под определение e_j признака.

Выполнив преобразования, (2.10) запишем в следующем виде:

$$I(e_j) = -\sum_{E_j \in E_i^r} P(E_j) log_2 P(E_j) + \sum_{r=1}^{f_j} \sum_{E_j = E_i^r} P(E_j) log_2 P(E_i) - \\ - \sum_{r=1}^{f_j} \sum_{E_j \in E_i^r} P(E_j) log_2 \sum_{E_j \in E_i^r} P(E_j) \quad (2.11)$$

Определение информативности всех признаков в соответствии с (2.11) позволяет из множества Q выбрать признак с наибольшим значением $I(e_j)$. Нормированные значения $I^*(e_j)$ могут использоваться для выбора совокупности признаков

$$F = \sum_{e_j \in G_T} I^*(e_j).$$

Наилучшей будет такая совокупность признаков, при которой $F = F_{max}$.

В качестве примера рассмотрим выбор при наличии семи признаков и необходимости распознавания пяти состояний E_1, E_2, E_3, E_4, E_5. Исходное описание зададим применительно к признакам, характеризующим анормальные режимы генераторов. В качестве первичных признаков, измеряемых при обучении использованы следующие параметры: x_1 – граничные зоны комплексного параметра $\dot{Z} = \dot{U} \cdot \dot{I}^{-1}$; x_2 – реактивная мощность; x_3 – ток возбуждения; x_4 – изменение аргумента $\dot{Z}(t)$ относительно фиксированных точек; x_5 – дифференциальная оценка времени относительно зон контроля; x_6 – позиционный алгоритм контроля $\dot{Z}(t)$; x_7 – интегральная оценка времени нахождения в зоне контроля. В качестве распознаваемых состояний использованы следующие режимы: E_1 – полная потеря возбуждения; E_2 – частичная потеря возбуждения; E_3 – двигательный режим;

E_4 – несинхронное включение; E_5 – асинхронный ход возбужденного генератора.

$$E = \begin{vmatrix} -0{,}90 & -0{,}80 & -1{,}00 & -0{,}90 & 0{,}75 & 1{,}00 & 0{,}95 \\ 1{,}00 & -0{,}70 & -0{,}85 & 0{,}90 & 0{,}85 & 0{,}85 & -0{,}75 \\ -0{,}95 & -0{,}85 & -0{,}95 & -1{,}00 & -0{,}95 & 0{,}80 & 0{,}85 \\ -0{,}85 & 0{,}85 & -0{,}95 & 0{,}95 & 0{,}65 & 1{,}00 & 0{,}90 \\ 0{,}90 & -0{,}75 & 1{,}00 & -0{,}85 & 0{,}80 & 0{,}95 & -0{,}85 \end{vmatrix}$$

В исходном описании количество строк соответствует числу состояний E, а количество столбцов - числу признаков e_j. Определение каждого признака осуществляется с затратами, приведенными к относительным единицам:

$$C(e_j)=\{3, 2, 4, 2, 5, 3, 4\}.$$

Уровень различимости задан равным $\delta=0{,}1$.

Бинарные признаки определяются в соответствии с зависимостью

$$\gamma = \begin{cases} 1, если \left|e_{qj} - e_{fj}\right| < \delta \\ 0, если \left|e_{qj} - e_{fj}\right| \geq \delta \end{cases},$$

Матрица различимости должна содержать семь столбцов и в соответствии с (2.7) $k=5\cdot4\cdot0{,}5=10$ строк. На основании анализа состояний получена матрица различимости

$$R=\begin{vmatrix} 1&0&1&1&0&1&1\\ 0&0&0&0&1&1&0\\ 0&1&0&1&0&0&0\\ 1&0&1&0&0&0&1\\ 1&1&0&1&1&1&1\\ 1&1&0&0&1&1&1\\ 0&0&1&1&0&0&0\\ 0&1&0&1&1&1&0\\ 1&0&1&1&1&1&1\\ 1&1&1&1&1&0&1 \end{vmatrix}$$

Все множество покрытий с учетом матрицы различимости равно

$$G_1=\{e_1, e_3, e_4, e_6, e_7\};\quad G_2=\{e_5, e_6\};\quad G_3=\{e_2, e_4\};$$
$$G_4=\{e_1, e_3, e_7\};\qquad G_5=\{e_1, e_2, e_4, e_5, e_6, e_7\};$$
$$G_6=\{e_1, e_2, e_5, e_6, e_7\};\ G_7=\{e_3, e_4\};\ G_8=\{e_2, e_4, e_5, e_6\};$$
$$G_9=\{e_1, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\};\quad G_{10}=\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_7\}.$$

Множества G_1, G_9 содержат в себе G_4, а G_5, G_6 и G_8 содержат G_2, следовательно, при составлении логических функций можно не учитывать поглощаемые множества $G_1, G_5, G_6, G_8, G_{10}$.

Составим логическую функцию в соответствии с (2.7) в конъюнктивной нормальной форме:

$$L=(e_5+e_6)(e_2+e_4)(e_1+e_3+e_7)(e_3+e_4).$$

Преобразуем полученную логическую функцию в функцию с дизъюнктивной нормальной формой записи, которая после известных упрощений будет иметь вид

$$L=e_5e_4e_1+e_6e_4e_1+e_5e_2e_3+e_6e_2e_3+e_6e_4e_3+e_5e_4e_7+e_5e_4e_3+e_6e_4e_7$$

По матрице различимости признаков L являются тупиковыми. Другими словами, если в любом сочетании убрать хотя бы один признак, то найдутся неразличимые состояния:

$$G_{T1}=\{e_5, e_4, e_1\}; \quad G_{T2}=\{e_6, e_4, e_1\}; \quad G_{T3}=\{e_5, e_2, e_3\};$$
$$G_{T4}=\{e_5, e_4, e_3\}; \qquad G_{T5}=\{e_6, e_2, e_3\};$$
$$G_{T6}=\{e_6, e_4, e_3\}; \quad G_{T7}=\{e_5, e_4, e_7\}; \quad G_{T8}=\{e_6, e_4, e_7\}.$$

Выберем наименьшие по затратам совокупности признаков:

$$C(G_{T1})=C(e_5)+C(e_4)+C(e_1)=10$$

Аналогично затраты остальных совокупностей составляют

$$C(G_{T2})=8; \quad C(G_{T3})=11; \quad C(G_{T4})=9;$$
$$C(G_{T6})=9; \quad C(G_{T7})=11; \quad C(G_{T8})=9.$$

Наименьшие затраты имеет совокупность

$$C(G_{T2})=(e_6, e_4, e_1).$$

Полученная совокупность первичных признаков e_1, e_4 и e_6 использована в каналах распознавания анормальных режимов генератора.

Для целей обучения могут быть использованы функции, основанные на комплексных критериях качества.

Необходимо отметить, что возможны гипотетические случаи, когда предпочтение тому или иному решающему правилу можно отдать без построения целевой функции.

В первом случае выполняется условие $y_{iR}>y_{im}$ для всех i, когда критериальные свойства отвечают правилу – чем больше значение y_i, тем выше качество решающего правила или условие $y_{ik}<y_{im}$, если, чем больше значение y_i, тем ниже качество. Другими словами, вариант k лучше варианта m по всем критериальным свойствам. Возможно не тривиальное доминирование свойств одного варианта над свойствами второго варианта, а, так называемое, абсолютное доминирование. Если известно, что имеется ранжирование свойств, причем чем ниже номер, тем выше ранг и второе критериальное свойство много ниже по значимости первого и т.д. Тогда при прямой зависимости качества от значения свойства вариант k лучше варианта m при $y_{1k}>y_{1m}$, не зависимо от соотношения всех остальных критериальных свойств. В случае $y_{1k}=y_{1m}$, а $y_{2k}>y_{2m}$, выбирается вариант k.

Однако на практике, как правило, встречаются ситуации, когда проигрыш по одному из свойств компенсируется выигрышем в другом свойстве и т.д.

Прежде всего необходимо изменения критериальных свойств записать в более удобной для анализа форме. Для этого прежде всего необходимо установить пределы y_i в условиях данной задачи и перейти к относительным величинам h_i, отражающим положение y_{ik} данного k-го варианта в этих пределах. На шкале свойств устанавливаются границы: y_i^B - верхнее значение, достигаемое при современном уровне техники; y_i^H - нижнее возможное значение; y_i^0 - граничное значение по определенным условиям. Относительное положение y_{ik} определяется путем функционального преобразования $h_i(y_i)$, такого, чтобы $h_i(y_i^H)=0$, $h_i(y_i^B)=\nu_i$, где ν_i –

коэффициент весомости i-го свойства. При инверсной зависимости качества от показателя (когда чем больше значение y_i, тем ниже качество) $h_i(y_i^H)=\nu_i$, $h_i(y_i^B)=0$ (рис. 2.10). В первом приближении преобразование можно представить в линейной форме. Угол наклона прямых задается экспертным путем исходя из условий задачи. Прямая *1* означает отказ от движения к y_i^B и исключение i-го свойства из целевой функции (оно остается лишь в ограничениях). Прямая *5* задается в том случае, если значение y_i^0 не может считаться удовлетворительным в перспективе. Прямая *3* задается в предположении линейного роста качества при изменении y_i от y_i^H до y_i^B. Прямые *2* и *4* – линейная аппроксимация рабочего отрезка предполагаемой кривой.

Степень приближения к y_i^B является оценкой степени идеальности значения y_{ik} (для инверсной зависимости – приближение к y_i^H). Приближение к идеальному значению будем считать мерой ценности. Ценность всего объекта будем определять как сумму ценностей каждого свойства:

$$E^* = \sum_{i=1}^{n} h_i(y_i) .$$

Задав значение ν_i как относительный вклад i-го свойства в качество идеального объекта при условии

$$\sum_{i=1}^{n} \nu_i = 1,$$

получим *E*=1*. Оценив при сравнении с ν_i значения $h_i(y_i^0) = h_i^0$, получим линейное приближение целевой функции (рис. 2.10) для рабочих интервалов y_i в среднеквадратичной форме

$$E_a^* = \sum_{i=1}^{n} \nu_i e_i \ ,$$

где e_i - степень приближения к идеальному значению *i*-го свойства:

$$e_i = \left[\left(h_i^0 \cdot \nu_i^{-1}\right)\left(y_i^{\text{В}} - y_i\right) + \left(y_i - y_i^0\right)\right]\left(y_i^{\text{В}} - y_i^0\right)^{-1},$$

$$e_i = \left[\left(h_i^0 \cdot \nu_i^{-1}\right)\left(y_i - y_i^{\text{Н}}\right) + \left(y_i^0 - y_i\right)\right]\left(y_i^0 - y_i^{\text{Н}}\right)^{-1},$$

соответственно для прямой и инверсной зависимости.

Значение целевой функции *E** для каждого варианта является комплексной оценкой его качества. Выбор формы целевой функции определяется следующими соображениями:

Рис. 2.9. Оценка параметров объекта во времени.

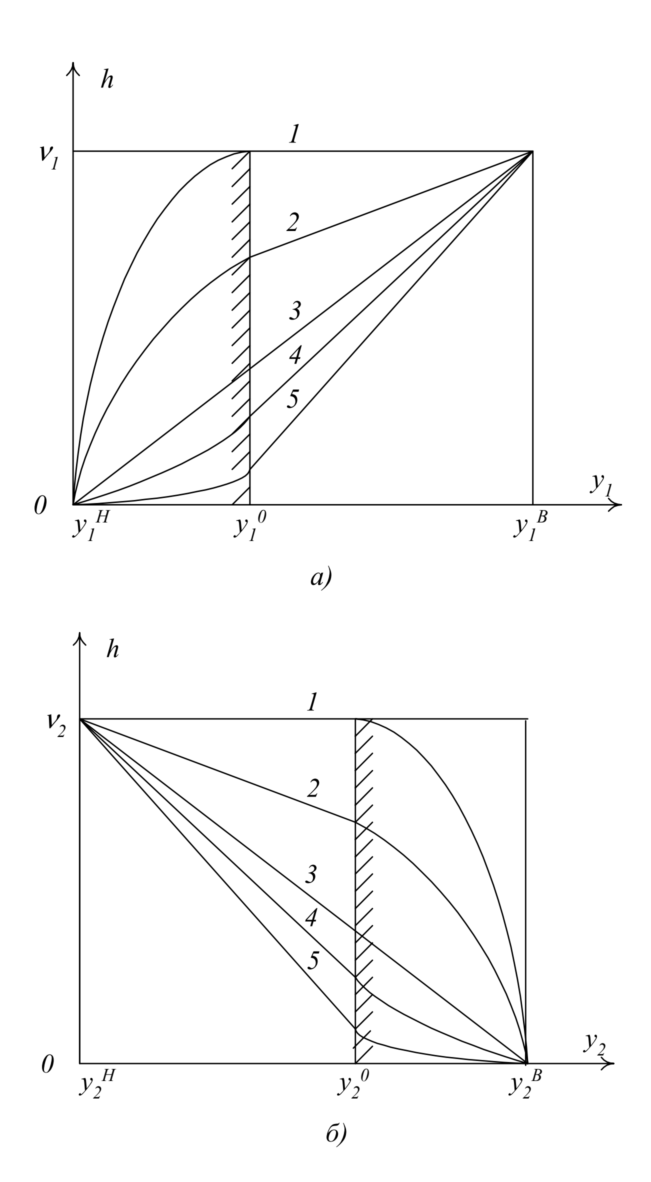


Рис. 2.10. Нормирование оценок свойств решающих правил при прямой (а) и инверсной (б) зависимости

- приближение к эталону для каждого свойства должно быть измерено в относительных единицах;
- каждое свойство должно быть отражено в функции E^* посредством коэффициента весомости ν_i, учитывающим его важность для эффективности решающего правила;
- нормирование величины e_i и ν_i должно обеспечивать оценку $E^*=1$ у идеального (эталонного) объекта;
- если показатели y_i измеримы, функция E^* должна быть непрерывной при всех значениях y_i в рабочем диапазоне и иметь

положительную первую производную при прямой и отрицательную при инверсной зависимости;

- целевая функция E^* должна дать возможность численной оценки всего комплекса свойств.

Для того, чтобы удовлетворить требованию обращения в нуль значения целевой функции вводятся функции с введением вето:

мультипликативная целевая функция

$$E_{\text{М}}^* = \prod_{i=1}^{n} (e_i)^{\nu_i} \text{ при } \sum_{i=1}^{n} \nu_i = 1,$$

средняя гармоническая форма

$$E_{\Gamma}^* = \left(\sum_{i=1}^{n} \nu_i e_i^{-1} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^{n} \nu_i = 1.$$

Рассмотрим пример использования процедуры обучения при ограничении автоматизированной системы контроля трансформатора. По существу задача сводится к следующему:

- имеется три варианта алгоритмов автоматизированных систем контроля трансформатора;
- варианты отличаются набором каналов состояния контроля;
- есть ряд критериальных свойств, характерных для системы контроля трансформатора.

Алгоритмический состав каналов измерения.

Вариант 1: - канал контроля газосодержания H_2, CH_4, C_2H_4, CO;

- измерение $tg\ \delta$;
- электрическое измерение по 4 уровням частичных разрядов (ЧР);
- акустическое измерение ЧР.

Вариант 2: - канал контроля газосодержания H_2, CH_4, CO;

- измерение $tg\ \delta$;

- электрическое измерение по 8 уровням ЧР;
- акустическое измерение ЧР.

Вариант 3: - канал контроля газосодержания H_2, CH_4;

- измерение $tg\ \delta$;
- электрическое измерение по 10 уровням ЧР;
- отсутствие акустического измерения ЧР.

Сравнение вариантов решающих правил по их свойствам проведем на основе методов квалиметрии и экспертных оценок. При этом используется комплексный критерий общей эффективности варианта в виде одной из средневзвешенных величин:

среднеарифметический $$\varphi_1 = \sum_{i=1}^{n} \nu_i e_i^k ,$$

среднегеометрический $$\varphi_2 = \left(\sum_{i=1}^{n} \nu_i / e_i^k \right)^{-1} ,$$

где ν_i – оценка весомости i-го свойства; ℓ_i^k - эффективность достижения i-го свойства в k-м варианте; n-количество рассматриваемых свойств.

Устройство контроля должно обладать рядом свойств: y_1 – минимум ненадежности в формировании управляющего воздействия при возникновении дефекта; y_2 – минимум ненадежности в режиме ожидания; y_3 – минимум потребления мощности; y_4 – минимум массы и габаритов; y_5 – минимум неудобств в эксплуатации устройства; y_6 – минимум погрешности; y_7 –минимум времени от момента возникновения дефекта до момента формирования управляющего воздействия; y_8 – минимум отсутствия унификации. Для определения весомости перечисленных свойств была осуществлена обработка результатов опроса более 30 специалистов. Результат обработки приведен в таблице 2.2. Значимость коэффициента

конкордации с экспертов проверялась по критерию $æ^2$. Было установлено, что с вероятностью 95% при коэффициенте конкордации C=0,7302 существует достаточно высокая согласованность экспертов. Относительная оценка эффективности свойств y_i получены из абсолютных с помощью преобразования

$$e_i^k = (y^{\text{В}} - y)\,(y^{\text{В}} - y^{\text{Н}}) - 1,$$

где y^B, y^H – соответственно максимальное и минимальное значения характеристик у сравниваемых вариантов; y –значение характеристики у оцениваемого варианта. Относительные оценки свойств и комплексные оценки эффективности приведены в таблице 2.3.

Рассматривая полученные результаты можно заметить, что варианты решающих правил имеют вполне различимые оценки, позволяющие использовать предлагаемую процедуру обучения.

Таблица 2.2.

Оценка весомостей и свойств y_i устройства контроля

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
0,202	0,181	0,105	0,060	0,089	0,128	0,181	0,054

Таблица 2.3.

Комплексная оценка эффективности вариантов

Вариант	Оценки e_i^k свойств								Общая эффективность	
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	φ_1	φ_2
1	0,319	0,915	0,993	0,352	0,348	0,400	0,500	0,407	0,619	0,508
2	0,237	0,915	0,997	0,482	0,398	0,900	0,500	0,456	0,613	0,470
3	0	0	0	0,167	0,204	0	0	0,167	0,037	0

ГЛАВА 3. ПЕРВИЧНЫЕ ПРИЗНАКИ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПРИ РАЗВИТИИ ДЕФЕКТОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ

Представленный в данной главе материал является обобщением исследований ряда признаков проверенных автором, которые используются при оценке состояния электрооборудования. Так, расширение интереса в энергетике к использованию инфракрасной термографии не поддержано адекватной метрологической основой учета реальных условий измерений, что зачастую приводит к большим погрешностям и ошибочным выводам о реальном состоянии обследуемого оборудования.

3.1. Искажения при приеме излучений электроустановок в инфракрасном диапазоне волн.

Приборы приема излучений в инфракрасном спектре электромагнитных колебаний находят все более широкое применение для дистанционного измерения температурного поля энергетического оборудования и оценки технического состояния по результатам измерений. Точность измерений, а следовательно достоверность окончательного принятия решения определяется комплексом факторов, которые должны быть учтены при планировании практических операций обследования объекта. Такими факторами являются инструментальная погрешность прибора, излучения фона, прозрачность и излучение среды, в которой осуществляется измерение. Измерения на открытом воздухе предполагают учет прозрачности и излучения атмосферы. Игнорирование этих факторов приводит к значительным погрешностям, достигающих в абсолютном выражении в ряде случаев нескольких десятков градусов.

Анализ искажений при терморадиометрических измерениях в электроустановках. Оптико-электронные приборы,

измеряющие температуру, реагируют на поток излучения от объекта и являются линейной системой в широком динамическом диапазоне только в функции потока излучения при яркости (светимости) объекта. Для удобства определения температуры по сигналу в тепловизорах используется градуировочная кривая, связывающая изотермические единицы сигнала с радиационной температурой объекта

$$I = \frac{P}{\exp(q/T_r) - 1},$$

Под изотермическими единицами понимается квантованный с помощью аналого-цифрового преобразователя сигнал на выходе оптико-электронного тракта. Величины P и q являются константами, определяющимися в процессе градуировки изделия, которые закладываются в информационно-измерительную систему тепловизора. Эти величины зависят от параметров тракта тепловизора, таких как апертура объектива, область спектра, пропускание оптики, вольтваттная чувствительность, мгновенное поле зрения. Таким образом

$$I = K_i \cdot S(\lambda m) \cdot Q_p \Omega \cdot \tau_0 \cdot \frac{1}{\pi} \int S(\lambda) \cdot R(\lambda, T_r) \partial\lambda,$$

где K_i-коэффициент пропорциональности, связывающий изотермические величины с напряжением сигнала; $S(\lambda_m)$-вольтваттная чувствительность приемника излучения на длине волны максимума относительной спектральной чувствительности $S(\lambda)$ оптико-электронного тракта; Q_p-площадь входного зрачка (апертура); Ω -телесный угол мгновенного поля зрения; τ_0-пропускание оптики и $R(\lambda,\ T_r)$ [Вт/м^2·мкм] -функция Планка, определяющая спектральную светимость объекта при температуре абсолютно-черного тела равной радиационной температуре объекта.

Запишем уравнение, из которого необходимо определить термодинамическую температуру объекта в условиях реальной атмосферы. В общем наиболее распространенном случае для непрозрачного диффузно излучающего объекта суммарная спектральная светимость, определяющая радиационную температуру, измеренную прибором, равна

$$R(\lambda, T_r) = \varepsilon(\lambda, \varphi) \cdot R(\lambda, T_0) \cdot \tau_a(\lambda, L) + R_a(\lambda, L) + \rho(\lambda, \varphi) \cdot E_{rf}(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, L),$$

где ε(λ,φ)-коэффициент излучения элемента объекта, зависящий в общем случае от типа материала, шероховатости, загрязнения поверхности и т. д., а также от угла наблюдения φ этой поверхности относительно своей нормали; ρ(λ,φ)-спектральный коэффициент отражения элемента объекта, связанный с ε(λ,φ) и зависящий от тех же факторов, что и коэффициент излучения; $R_a(\lambda,L)$-спектральная светимость столба атмосферы на трассе наблюдения, зависящая от спектрального пропускания атмосферы $\tau_a(\lambda,L)$ на трассе от объекта до наблюдателя, которое в свою очередь зависит от совокупности условий, называемых "оптической погодой" атмосферы; $E_{rf}(\lambda)$-спектральная освещенность объекта от излучения окружающей среды, формирующая отраженную составляющую излучения объекта.

Поскольку в основном объекты (за исключением диэлектриков и полированных материалов) можно считать диффузными или зеркально-диффузными отражающими непрозрачными телами, то в этом случае $\rho(\lambda,\varphi)=1-\varepsilon(\lambda,\varphi)$ и спектральная освещенность будет равна

$$E_{rf}(\lambda) = E_{hS}(\lambda) + E_{1S}(\lambda) + E_{bS}(\lambda) + E_S(\lambda),$$

где $E_{hS}(\lambda)$-освещенность элемента поверхности объекта от верхней полусферы; $E_{1S}(\lambda)$- освещенность элемента поверхности от нижней

полусферы; $E_{bS}(\lambda)$-освещенность от боковых источников излучения, $E_S(\lambda)$-освещенность прямого солнечного излучения.

Все вышеупомянутые составляющие светимости объекта могут иметь при определенных обстоятельствах существенный вклад, поэтому их необходимо уметь оценивать и при возможности осуществлять их аппаратурный контроль.

Интегрирование по спектру с учетом относительной спектральной чувствительности дает эффективные величины энергетических характеристик в спектральной полосе чувствительности прибора.

Напишем уравнение суммарной светимости в эффективных величинах

$$R(T_r) = \varepsilon(\varphi) \cdot R(T_0) \cdot \tau_a(T_0, L) + R_a(L) + (1 - \varepsilon(\varphi)) \cdot E_{rf} \cdot \tau_a(L), \qquad (3.1)$$

где ε(φ)-средняя величина коэффициента излучения объекта в области чувствительности прибора, а эффективная светимость абсолютно черного тела при температуре T_0 равна

$$R(T_0) = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \cdot S(\lambda) \partial\lambda,$$

Рассмотрим составляющие уравнения (3.1).

Коэффициенты излучения зависят от угла наблюдения φ, что отмечено в общей формуле (3.1). Наибольшую зависимость от угла наблюдения при углах $\varphi > 60^0$ имеют диэлектрики и металлы, а из природных объектов вода. Поскольку специфика данной работы направлена на измерения в условиях земной атмосферы, то металлы в этих условиях имеют окисные пленки или защитные покрытия, кардинальным образом меняющие коэффициент излучения и приближающие его к серому телу с малой угловой зависимостью. Поэтому, если углы наблюдения не превышают 60^0, то $\varepsilon(\varphi)=\varepsilon$,

а при больших углах необходимо решать вопрос в конкретных случаях в зависимости от материала объекта и наличия локального сильно излучающего бокового источника.

Эффективный коэффициент пропускания атмосферы на трассе наблюдения равен

$$\tau(T_0, L) = \frac{\int\limits_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, L)\partial\lambda}{\int\limits_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_0) \cdot S(\lambda)\partial\lambda}, \quad (3.2)$$

Величина $\tau_a(T_0,L)$ в окне прозрачности атмосферы 8-12 мкм приблизительно равна среднему коэффициенту пропускания в пределах области чувствительности и слабо зависит от температуры измеряемого объекта, поэтому при оценке пропускания в (3.1) и (3.2) можно использовать $T_0=T_r$. Эта величина вводится для удобства анализа и упрощения оценок.

Спектральное пропускание атмосферы определяется молекулярным и аэрозольным поглощением и рассеянием. Методика расчета спектрального пропускания очень сильно зависит от требуемого спектрального разрешения и однородности атмосферной трассы. В данном разделе рассматривается методика расчета пропускания для однородного приземного слоя атмосферы для приборов грубого разрешения, составляющего 0,1 мкм.

Суммарный коэффициент пропускания $\tau_a(\lambda,L)$ для проходимого излучением расстояния L определяется отношением прошедшего потока к падающему потоку.

Этот коэффициент в основном состоит из двух членов

$$\tau_a(\lambda, L) = \tau_m(\lambda, L) \cdot \tau_{SC}(\lambda, L),$$

где $\tau_m(\lambda,L)$-спектральное пропускание, определяемое молекулярным поглощением и $\tau_{SC}(\lambda,L)$ - спектральное пропускание, определяемое

аэрозольным рассеянием. Влияние молекулярного рассеяния и аэрозольного поглощения в областях теплового излучения существенно меньше, чем этих двух факторов.

В приземном слое наиболее сильное влияние при грубом спектральном разрешении аппаратуры оказывают пары воды и углекислого газа, поэтому

$$\tau_m(\lambda, L) = \tau_{H_2O}(\lambda, H_R, L) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda, L),$$

Пропускание водяного пара атмосферы определяется толщиной слоя осажденной воды, содержащейся в слое L между объектом и наблюдателем. Между толщиной слоя осажденной воды h, температурой T_{ai} и относительной влажностью h_r существует определенная связь, приведенная в таблице 3.1 для насыщенной атмосферы при h_r=100% и расстоянии 1 км. Для атмосферы с относительной влажностью, отличной от 100%, нужно умножить данные таблицы на h_r, выраженную в долях единицы. Например, при относительной влажности 10% и температуре 10^0С толщина слоя осажденной воды равна 1 мм на 1 км пути в атмосфере.

В этой таблице приведены точки узлов линейной интерполяции по температуре воздуха между lgh' по следующей формуле

$$\lg h'(T_i) = \frac{(T_i - T_1) \cdot (\lg h'(T_2) - \lg h'(T_i))}{T_2 - T_1} + \lg h'(T_i),$$

$$h'(T_i) = 10^{\lg h'(T_i)},$$

где $T_1 < T_2$ – узловые точки, T_i – температура воздуха, при которой определяется толщина слоя осажденной воды.

Расчеты по эмпирическим формулам коэффициента пропускания паров воды для выбранного спектрального диапазона в функции толщины слоя

осажденной воды проводились рядом исследователей. Данные, приводимые в таблицах для расчета прозрачности для горизонтальных трасс на уровне моря, согласованы с экспериментальными данными с целью достижения лучшего соответствия. С ростом высоты наблюдается сужение спектральных полос поглощения из-за уменьшения давления, что приводит к улучшению пропускания. Пропускание улучшается также и за счет уменьшения содержания водяных паров в атмосфере с ростом высоты.

Таблица 3.1.

Толщина слоя осажденной воды h'[мм/км] в функции температуры воздуха для относительной влажности h_r=100%

T_{ai}, °C	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
h' [мм/км]	0,185	0,46	1,1	2,5	4,6	10	18,5	30,8	51,4

Таблица 3.2.

Эффективная освещенность верхней полусферой горизонтальных и вертикальных поверхностей наземных объектов в [Вт/м^2]

Поверхности объекта	Весна		Лето		Осень		Зима	
	Облака	Ясно	Облака	Ясно	Облака	Ясно	Облака	Ясно
Горизонтальн. E^h_{kS}	69	23	91	40	77,2	27,6	58	15,7
Вертикальная E^h_{kS}	35	15,2	46	26,4	39	18,2	29	10,4

Таким образом, для расчета пропускания в приземном слое высотой до ≈300м независимо от направления наблюдения можно считать, что толщина слоя осажденной воды равна

$$h[мм] = h_r \cdot h'[мм / км] \cdot L[км],$$

Далее спектральное пропускание определяется из таблиц путем линейной интерполяции по толщине слоя осажденной воды.

Концентрация углекислого газа в атмосфере в силу его равномерного распределения зависит только от давления. Следовательно, в приземном слое коэффициент пропускания углекислого газа τ_{CO_2} (λ, L) зависит только от расстояния проходимого излучением объекта до наблюдателя.

Рассеяние на частицах, содержащихся в атмосфере, вызывает ослабление излучения, суммирующееся с ослаблением вследствие поглощения газами. В соответствии с размерами можно выделить частицы следующих типов.

Аэрозоли. Очень мелкие частицы, взвешенные в атмосфере.

Дымка. Причиной возникновения дымки являются микроскопические пылинки (0,5 мкм), на которых во влажной атмосфере конденсируются молекулы воды, и поэтому они могут увеличиваться в размере.

Туман. Когда частицы, вызывающие дымку увеличиваются в размерах и превращаются в капельки воды или кристаллики льда, дымка становится туманом.

Коэффициент пропускания, определяемый явлением рассеяния, равен

$$\tau_{SC}(\lambda, L) = \exp(-y(\lambda) \cdot L). \quad (3.3)$$

Контраст между объектом и окружающим фоном, наблюдаемый сквозь рассеивающую среду, уменьшается с ростом рассеяния. Минимальный

контраст, воспринимаемый человеческим глазом ≈2%. Метеорологическая дальность видимости $L_{МДВ}$- это расстояние, на котором объект с начальным контрастом, равным единице, после прохождения сквозь среду воспринимается на пределе с контрастом около 2%.

Коэффициент рассеяния в видимой области на длине волны λ_0=0,6 мкм равен

$$\gamma(\lambda_0) = 3{,}92 / L_{МДВ},$$

Соотношение между коэффициентами рассеяния для λ_0 и для любой другой длины волны имеет вид

$$\gamma(\lambda_0) / \gamma(\lambda) = (\lambda_0 / \lambda)^{\alpha},$$

откуда коэффициент рассеяния, подставляемый в формулу (3.3), равен

$$\gamma(\lambda) = \gamma(\lambda_0) \cdot (\lambda_0 / \lambda)^{\alpha}.$$

При наличии дымки с характеристиками, наиболее часто встречающимися на земной поверхности, α=1,3. С ростом размера частиц α уменьшается. Величине метеорологической дальности видимости соответствует различное состояние погоды, которое визуально характеризуется: $L_{МДВ}$<3 км – туман, 3<$L_{МДВ}$<10км – дымка, 10<$L_{МДВ}$<25 км – ясно, 25<$L_{МДВ}$<50 км – очень ясно.

Светимость атмосферного столба с температурой воздуха T_{ai} в нижнем слое между объектом и наблюдателем равна

$$R_a(L) = \int\limits_{\Delta\lambda} S(L) \cdot R(\lambda, T_{ai}) \cdot (1 - \tau_m(\lambda, L)) \partial\lambda,$$

и может быть записана через эффективный коэффициент пропускания атмосферы

$$R_a(\lambda) = R(T_{ai}) \cdot (1 - \tau_m(T_{ai}, L)).$$

Освещенность верхней полусферой формируется излучением всей толщи атмосферы (включая облака), просуммированной по всему телесному углу полусферы. Вследствие того, что распределение яркости верхней полусферы неравномерно по зенитному углу Θ, проводится разбиение небосвода по альмукантаратам на зоны с одинаковой яркостью и дальнейшее суммирование по всем зонам. Полусферическое освещенность зависит от ориентации освещаемой площадки. Для горизонтальной поверхности эффективная освещенность от верхней полусферы может быть определена

$$E^h{}_{kS}(\lambda) = \pi * \sum_{j=1}^{N-1} B_i(\lambda, \Theta_j) \cdot f(\Theta_{j+1} - \Theta_j), \quad (3.4)$$

$$E^h{}_{kS} = \int_{\Delta\lambda} E^h{}_{kS}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \partial\lambda, \quad (3.5)$$

где $B_i(\lambda,\Theta_j)$ – спектральная яркость нисходящего излучения атмосферы при зенитном угле Θ_j, а весовая функция равна

$$f(\Theta_{j+1} - \Theta_j) = Sin^2\Theta_{j+1} - Sin^2\Theta_j.$$

Для вертикальной поверхности эффективная освещенность E^{υ}_{hS} может быть определена по формулам (3.4), (3.5), но с весовой функцией

$$f(\Theta_{j+1} - \Theta_j) = (Sin\ \Theta_{j+1} + Sin\ \Theta_j) \cdot (Cos\Theta_j - Cos\Theta_{j+1}) / \pi,$$

Математическое моделирование нисходящего излучения атмосферы проводилось по статистически обоснованным исходным данным о погодных комплексах, характерных для средних широт Европы.

Для этих погодных комплексов на основе метеорологических данных наблюдений были получены вертикальные профили распределения основных атмосферных параметров, необходимых для расчета прозрачности и излучения атмосферы (высотные профили давления, температуры, количества осажденной воды и коэффициента аэрозольного рассеяния).

На основе этих данных в результате математического моделирования была получена спектральная яркость верхней полусферы и далее определены эффективные величины полусферической освещенности горизонтальных и вертикальных поверхностей. Данные по эффективной освещенности засветки верхней полусферы в спектральном диапазоне чувствительности на уровне 0,5 8-12 мкм, приведены в таблице 3.2. в условиях, когда влияние пропускания атмосферы на трассе наблюдения пренебрежимо мало.

Освещенность от прямого солнечного излучения. Освещенность площадки объекта от прямого солнечного излучения может быть оценена по формуле

$$E_S = Cos\varphi \cdot \int_{\Delta\lambda_S} S(\lambda) \cdot E_{S0}(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, \Theta_S) \cdot \tau_a(\lambda, L) \partial\lambda,$$

где $E_{S0}(\lambda)$ – спектральная освещенность Солнца верхней границы атмосферы,

$\tau_a(\lambda, \Theta_S)$ – спектральная прозрачность всей толщи атмосферы при зенитном угле Солнца Θ_S, φ – угол между направлением нормали к площадке и падающим излучением.

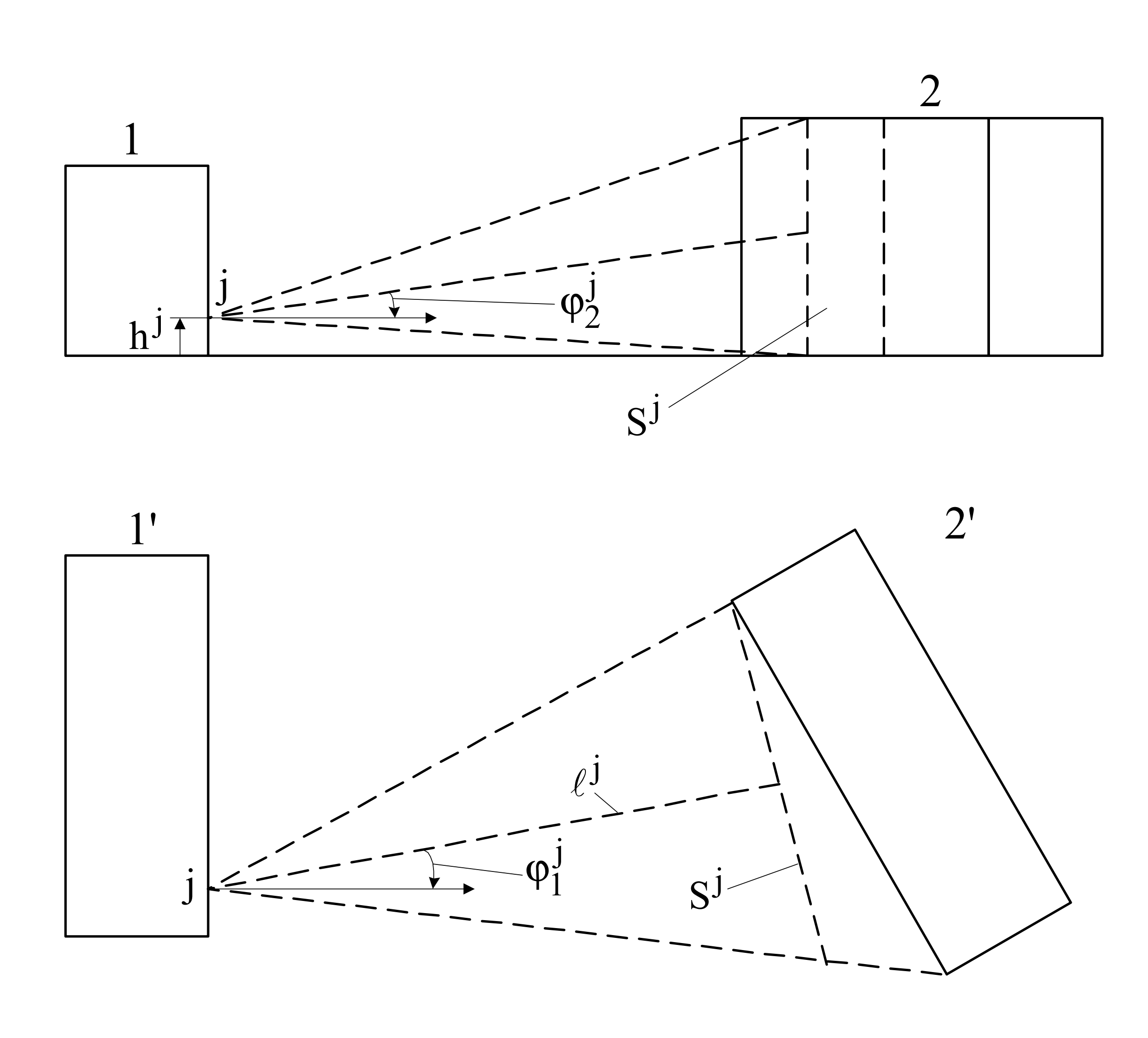


Рис. 3.1. Схема определения освещенности от бокового источника.

1- объект; 2- источник боковой засветки; 1′ и 2′ - вид сверху;

S^j – проекция источника боковой засветки.

В спектральном диапазоне работы тепловизора Δλ=8-12 мкм освещенность Солнца на поверхности Земли незначительна и ею можно пренебречь, но спектральная характеристика чувствительности может иметь подъемы в области мощного коротковолнового излучения Солнца, поэтому при оценке эффективной освещенности необходимо рассматривать всю спектральную чувствительность прибора в полосе, обозначенной как $\Delta\lambda_S$. В области спектра 3-5 мкм солнечное излучение дает большой вклад, который требует детального анализа, но не рассматривается на данном этапе, поскольку большинство теплофизических задач решается с помощью тепловизионной съемки при отсутствии прямого солнечного излучения или используется тепловизор на длинноволновую область спектра.

Освещенность нижней полусферой. Освещенность нижней полусферой формируется излучением земной поверхности с температурой T_g и излучением нижнего слоя атмосферы, находящегося ниже освещаемой площадки.

Для горизонтальной площадки, находящейся на высоте H над землей, эффективная освещенность может быть определена

$$E^h{}_{lS} = \sum_{j=1}^{N-1} f(\alpha_{j+1} - \alpha_j)(R1 + R2),$$

$$R1 = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_g) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, H / Cos\alpha'_j)\partial\lambda,$$

$$R2 = \int_{\Delta\lambda} R(\lambda, T_{aj}) \cdot S(\lambda) \cdot (1 - \tau_m(\lambda, H / Cos\alpha'_j))\partial\lambda,$$

$$f(\alpha_{j+1} - \alpha_j) = Sin^2\alpha_{j+1} - Sin^2\alpha_j,$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \Delta\alpha,\ \alpha_1 = 0,\ \alpha_N = 90^0,\ \alpha'_j = \frac{\alpha_{j+1} + \alpha_j}{2}.$$

Для вертикальной площадки, находящейся на высоте H, вычисление E^{υ}_{lS} осуществляется по вышеприведенным формулам, но с использованием весовой функции

$$f(\alpha_{j+1}-\alpha_j)=(Sin\ \alpha_{j+1}+Sin\ \alpha_j)(Cos\alpha_j-Cos\alpha_{j+1})/\pi,$$

Углы α отсчитываются от направления в надир. Если T_g близко к T_{ai}, то

$$E^h_{lS}\approx R(T_{ai})\cdot\tau(T_{ai},L),\ a\ E^{\upsilon}_{lS}\approx 0,5\cdot R(T_{ai})\cdot\tau(T_{ai},L).$$

И з л у ч е н и е б о к о в о г о и с т о ч н и к а. Переменная засветка возникает вследствие неравномерной освещенности поверхности объекта со стороны окружающего фона. Освещенность объекта от фона, используемая в (3.1), равна

$$E_{rf}=E_{hs}+E_{1s}+E_{bs},$$

Освещенность верхней полусферой E_{hs} в случае чистой атмосферы, сплошной облачности и даже отдельных облаков ввиду большого расстояния до освещаемого объекта, практически равномерна. Освещенность нижней полусферой E_{ls}, как правило, также практически равномерна, в то время как освещенность от бокового источника, находящегося на сравнительно близком расстоянии, вызывает неравномерность засветки. (E_{ls} вызывает неравномерность засветки по высоте объекта, если температура земной поверхности, прилежащей к объекту, значительно отличается от температуры воздуха T_{ai}).

В общем случае освещенность от бокового источника можно определить с помощью рисунка 3.1, где для примера приведена схема засветки для двух точек вертикальной поверхности объекта j и j_0.

Освещенность объекта от бокового источника с радиационной температурой T_{bs} для i-ой точки равна

$$E_{bs}(\lambda) = R(\lambda, T_{bs}) \cdot \gamma^j$$

$$\gamma^j = \frac{r^2 \cos\alpha_1^j \cos\alpha_2^j}{L^{j2}\left(1 + r^2 / L^{j2}\right)}$$

$$r^2 = S_{bs}^j / \pi$$

где S_{bs}^j - площадь проекции источника боковой засветки на плоскость перпендикулярную направлению нормали из центра проекции источника боковой засветкой.

Термодинамическая температура по измеренной радиационной температуре находится после оценки всех составляющих из уравнения (3.1). Уравнение решается относительно $R(T_0)$ и имеет вид

$$R(T_0) = \frac{R(T_r) - (1 - \varepsilon) \cdot E_{rf} \cdot \tau_a(L) - R_a(L)}{\varepsilon \cdot \tau_a(T_0, L)},$$

где эффективный коэффициент пропускания фоновой засветки определяется по формуле, аналогичной (3.2)

$$\tau_a(L) = \frac{\int_{\Delta\lambda} E_{rf}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda, L) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} E_{rf}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}.$$

Далее для определения T_0 можно использовать графики и таблицы зависимости светимости абсолютно черного тела от температуры. Решение уравнения для $I = R(T_0)$ относительно температуры имеет вид

$$T_0 = \frac{T_m}{ln((P + R(T_0)) / R(T_0))}.$$

Коэффициенты T_m и P определяются из аппроксимации расчетных значений эффективной светимости абсолютно черного тела в функции температуры

$$R(T_0) = \frac{P}{exp(T_m / T_0) - 1}.$$

Поскольку параметр T_m, имеющий размерность температуры, входит в формулу нелинейно, то для определения искомых параметров T_m и P используют итерационные методы решения неявных уравнений. Оптимальная величина коэффициента T_m, определяемая из условия минимальной погрешности аппроксимации, находится близко к величине, используемой в качестве первого приближения $T^1{}_m = C_2/\lambda_m$, где $C_2 = 14388^0$К·мкм, λ_m- длина волны максимума спектральной функции чувствительности тепловизора. Тогда величина первого приближения коэффициента P составляет

$$P^1 = R(T_{0m}) \cdot (\exp(T^1{}_m / T_{0m}) - 1), \qquad (3.6)$$

где T_{0m}-средняя температура в диапазоне аппроксимации эффективной светимости абсолютно черного тела.

Следует отметить, что результаты термографического обследования сильно зависят от угла наблюдения. Следствием этого является отличие друг от друга функций $f_i(T_c/\gamma)$, найденных при различных ракурсах объектов γ (рис. 3.1), где γ угол наблюдения объекта в тепловизионную камеру.

Таким образом, на основании анализа связи статистических характеристик термодинамической температуры с ракурсом наблюдаемого объекта можно сделать вывод о том, что законы распределения вероятностей некоторых признаков распознавания весьма существенно зависят от условий наблюдения объектов. С другой стороны, такой признак как уровень частичных разрядов практически не связан с ракурсом объекта относительно места измерения: $f_i(X/\gamma) = f_i(X)$ для всех X, γ и номеров классов $i = \overline{1,M}$. Следовательно, все признаки распознавания можно условно разбить на несколько категорий по степени устойчивости их характеристик к вариациям условий измерения.

3.2. Исследования результатов хроматографического анализа энергетических масел.

Решение задачи обоснования критериев оценки состояния маслонаполненного оборудования невозможно без обобщения результатов хроматографического анализа, учитывающего особенности решения указанных проблем в различных энергосистемах.

Состояние трансформатора характеризуется концентрациями газов (H_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2, CO_2, CO), скоростью изменения концентраций, нагрузкой трансформатора, температурой масла, возрастом аппарата, типом масла, конструкцией аппарата, классом напряжения. В результате мы имеем, по крайней мере, двадцати-мерное пространство состояний трансформатора (по числу перечисленных выше параметров). Каждый из параметров имеет несколько уровней градации. На практике возможно произвольное сочетание перечисленных признаков, что приводит к совершенно непредставляемой смеси данных, в которой мы обязаны обнаружить сочетание, характеризующее дефект. Дефекты также могут быть представлены подобной моделью. Из всего этого вывод однозначный – представление о законах, вызывающих наблюдаемую изменчивость, возможно получить только на основе статистического анализа.

Разрешение проблемы диагностических критериев опирается, главным образом, на возможность их сопоставления для различных типов оборудования, различных условий эксплуатации, различных сроков эксплуатации. В конечном итоге, это опять проблема многомерности рассматриваемой задачи. Разрешить ее сейчас невозможно, при анализе необходимо рассматривать лишь некоторые сечения этого многомерного пространства.

Приводимые ниже результаты расчетов для нормального (безаварийного) режима работы представлены в виде краткого обзора и ставят целью

обозначить для наблюдаемого объема данных основные принципиальные моменты, без их подробного анализа и без формулирования выводов.

При проведении анализа осуществляется:

– оценка однородности массивов диагностических параметров (концентрация, приращение концентрации, относительное приращение концентрации, относительная скорость изменения концентрации) для ряда типов трансформаторов, а также однородность массивов одноименных диагностических параметров;

– оценка статистических характеристик диагностических параметров;

– оценка корреляционных связей между диагностическими параметрами каждого из семи газов, между анализами, между газами для каждого диагностического параметра;

– расчет усредненной реализации для нормального режима (усреднение по числу анализов для каждого трансформатора, затем – усреднение по парку трансформаторов);

– расчет статистических характеристик усредненной реализации.

Для анализа были выбраны наиболее распространенных четыре типа трансформаторов класса 110 кВ: ТДТН, ТРДН, ТДН и ТМН. Трансформаторы этих типов в энергосистемах составляют около 85 % .

Каждый из трансформаторов индивидуален поскольку разработка и производство трансформаторов класса 110 кВ и выше, в общем-то, индивидуальные. Режимы работы также индивидуальны. Поэтому корректным подходом при оценке однородности исходной выборки было бы сравнение результатов анализов трансформаторов одного типа между собой, а затем – между разными типами трансформаторов.

На сегодняшний день этот вариант неосуществим – в базах данных содержатся данные не более чем о 4-10 анализах по каждому трансформатору, что недостаточно. Поэтому приходится принять допущение, что трансформаторы одного типа изначально составляют однородную

выборку. Анализ однородности проводился по критерию Колмогорова-Смирнова на уровне значимости 0,05. Методика проверки состояла в следующем.

Из базы данных выбирались результаты анализов трансформаторов 110 кВ типов ТДТН, ТРДН, ТДН, ТМН, не стоящих на контроле. Затем для каждого типа формировались последовательности (усредненных по числу анализов для каждого трансформатора) концентраций, приращений концентраций, и относительных скоростей изменения концентраций по каждому из семи газов. Полученные последовательности одноименных параметров для каждого газа проверялись на однородность.

Результаты тестов показывают, что для выборки абсолютных концентраций трансформаторов типа ТМН по 5 из 7 газов оказываются неоднородными с выборками для трансформаторов других типов. Для трансформаторов типа ТДН и ТРДН неоднородны выборки по этану C_2H_4 и углекислому газу CO_2, для остальных газов между ТДН и ТРДН, а также для остальных сочетаний между ТДТН, ТРДН и ТДН необходимое условие неоднородности выборок соблюдается.

По относительным скоростям изменения концентраций неоднородными оказались выборки по ацетилену C_2H_2 для сочетания ТМН, ТРДН и окиси углерода СО для ТМН, ТРДН и для ТМН, ТДТН. Сравнение однородности данных для двух энергосистем дали следующие данные. Сравнение проводилось для однотипных трансформаторов (для ТДТН и ТРДН) по одноименным газам отдельно для каждого диагностического параметра.

Итоги тестирования следующие.

Абсолютные концентрации - для обоих типов трансформаторов неоднородны выборки по водороду и метану. Необходимое условие однородности соблюдается для выборок ацетилена и окиси углерода. По остальным газам результаты тестов для ТДТН и ТРДН не совпадают.

Приращения концентраций - неоднородны выборки по окиси углерода для обоих типов трансформаторов и по углекислому газу для ТРДН. Для остальных газов для обоих типов трансформаторов расчетные значения критерия ниже граничных величин.

Относительные скорости изменений концентраций - для обоих типов трансформаторов неоднородны выборки по водороду и окиси углерода. По остальным газам результаты тестов не противоречат гипотезе об однородности выборок.

Таким образом, данными, обеих энергосистем можно воспользоваться для дальнейшего анализа поведения диагностических параметров ряда газов. Однако для строгого доказательства однородности данных обеих энергосистем, и, кроме того, для объяснения расхождений в результатах тестов на однородность для заметной части абсолютных концентраций, а также приращения СО и относительной скорости изменения СО требует дополнительных исследований.

Результаты тестов на однородность выборок диагностических параметров для разных типов трансформаторов позволяют перейти к дальнейшему анализу данных.

Итоги расчетов основных статистических характеристик для объединенной (ТДТН, ТРДН, ТДН) по каждому диагностическому параметру приведены в таблицах 3.3-3.5. Данные приводятся в значениях абсолютных концентраций.

При проведении расчетов исключались аппараты, стоящие на контроле. Расчеты проведены для выборок, составленных из значений, полученных усреднением по числу анализов для каждого отдельного трансформатора (усреднение по времени). Таким образом, приводимые данные есть результат усреднения сначала, по времени, а затем по ансамблю.

Таблица 3.3.

Абсолютные концентрации газов в масле

	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO_2	CO
Объем выборки	175	175	175	175	175	175	175
Среднее	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,012
Медиана	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,16	$9,2 \cdot 10^{-3}$
Мода	0	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0	0,14	$3 \cdot 10^{-3}$
Дисперсия	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$
Среднеквад. откл.	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,07	$9,8 \cdot 10^{-3}$
Минимум	0	0	0	0	0	0	0
Максимум	0,057	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,029	$8,5 \cdot 10^{-3}$	0,0143	0,301	0,051

Таблица 3.4.

Приращение концентраций газов в масле

	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO_2	CO
Объем выборки	175	175	175	175	175	175	175
Среднее	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$-2,3 \cdot 10^{-5}$	$-2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$-1,2 \cdot 10^{-3}$
Медиана	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	0	0	$-3,6 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-3}$
Мода	$1 \cdot 10^{-5}$	0	$3 \cdot 10^{-5}$	0	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-5,3 \cdot 10^{-3}$	0
Дисперсия	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Среднеквад. откл.	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	0,018	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Минимум	0,024	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	$-7,7 \cdot 10^{-3}$	$-6,4 \cdot 10^{-4}$	$-1,2 \cdot 10^{-3}$	-0,063	-0,012
Максимум	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,059	0,011

Таблица 3.5.

Относительные скорости изменения концентраций газов в масле

	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO_2	CO
Объем выборки	175	175	175	175	175	175	175
Среднее	28,7	0,034	1,454	1,203	1,130	-0,105	30,7
Медиана	10,8	0,134	0,074	0,422	0,190	0,028	15,4
Мода	7,61	0,109	0,047	0,277	-0,156	0,026	9,15
Дисперсия	1595	10,43	48,76	6,494	29,93	7,284	1475
Среднеквад. откл.	39,9	3,230	6,982	2,548	5,471	2,698	38,4
Минимум	-0,16	-23,68	-0,032	-0,577	-29,86	-19,08	-33,0
Максимум	175	4,558	52,62	14,23	20,83	8,430	158,2

Таблица 3.6.

Сигнальная последовательность

Объем выборки	2240
Среднее	$-4 \cdot 10^{-9}$
Медиана	-0,220
Мода	0,194
Дисперсия	0,987
Среднеквад. откл.	0,993
Минимум	-6,542
Максимум	8,482

Статистические характеристики стандартизованной (относительно среднеквадратичного отклонения) сигнальной последовательности представлены в таблице 3.6.

Анализ распределений всех диагностических параметров для всех газов, а также сигнальной последовательности, показал их явно негауссовский характер. Однако на данном этапе аппроксимация полученных распределений каким-либо законом не проводилась.

Для диагностики трансформаторов по результатам хроматографического анализа используют:

- абсолютные концентрации газов Cg;
- относительные скорости изменения концентраций vCg;
- отношение концентраций Cgi/Cgj.

Кроме того, для рассмотрения доступны также:

- концентрации газов предыдущего анализа Cg_pred;
- отношение dCg/Cg_pred.

Каждый из перечисленных параметров изменяется во времени (от анализа к анализу), а также подвержен вариации по ансамблю наблюдаемых трансформаторов.

Таким образом, каждый из семи газов может быть описан, по крайней мере, в пятимерном пространстве состояний (время, т.е. анализы, ансамбль и три параметра Cg, vCg, dCg. Отношение концентраций в данном случае явно коррелировано с Cg и дополнительной информации о процессах не несет).

В таком случае, состояние трансформатора, как минимум, будет описываться вектором в пространстве 7х5 (7 газов на 5 координат).

Самым естественным желанием в этой ситуации является желание оценить характер и величины статистических связей между параметрами каждого из газов, между одноименными параметрами газов, а также связь указанных величин во времени и по ансамблю трансформаторов.

Целью вычислений, результаты которых приводятся ниже, является выяснение набора некоррелированных координат (для снижения размерности

задачи) при описании состояния трансформатора по результатам хроматографического анализа.

Таким образом, итоговая корреляционная матрица должна 6ыть шестимерной (газ - параметр газа - время - объект (трансформатор) - тип трансформатора - значение коэффициента корреляции).

В настоящий момент для усреднения по времени слишком мало данных (5-10 анализов), поэтому данное сечение из рассмотрения необходимо удалить в связи с малой достоверностью получаемых результатов. Однако делается попытка косвенно оценить взаимосвязь параметров во времени.

Из остальных сечений общей матрицы корреляций рассчитывались:

- корреляционная матрица по параметрам (Cg_pred, Cg, dCg, dCg/Cg_pred, vCg) для каждого из газа (по трем типам тр-в) - оценка взаимосвязи по параметрам для каждого газа;

- корреляционная матрица по газам для каждого из параметров (по трем типам тр-в) - оценка взаимосвязи по газами для каждого параметра;

- автокорреляционная матрица сигнальной последовательности, сформированной путем соединения в данную последовательность параметров каждого газа (мгновенное сечение в пространстве состояний трансформатора). Автокорреляционная матрица усреднялась по последним 5 анализам каждого трансформатора, а затем - по парку аппаратов (для 3 типов трансформаторов);

- корреляционная матрица сигнальных последовательностей для последних 5 анализов, усредненная по парку трансформаторов;

- тест на однородность сигнальных последовательностей двух соседних анализов. Этим делается косвенная оценка связи параметров во времени.

Анализ корреляционных матриц по параметрам 3 типов трансформаторов показал коррелированность Cg_pred, Cg, dCg для всех газов. Причем соб-людается как характер корреляции (Cg_pred, Cg "+", Cg_pred, dCg "-", Cg, dCg "+"), так и довольно близки величины значения коэффициента корреляции для

одноименных газов (кроме H_2) по всем 3 типам трансформаторов. Характер корреляции между параметрами полностью совпадает и на базе Ленэнерго, хотя значения коэффициента корреляции несколько отличны от данных, полученных по базе Владимирэнерго.

Данные позволяют считать статистически связанными Cg_pred, Cg, dCg, vCg практически некоррелирована с dCg, Cg, Cg_pred.

Анализ корреляционной матрицы по газам показал коррелированность CH_4 и C_2H_4 для всех параметров.

Корреляционная матрица последовательностей вида H_2, dH_2, dH_2/H_2_pred…..CO, dCO, dCO/CO_pred, vCO по последним 5 анализам каждого трансформатора. (с усреднением корреляционной матрицы по парку) для 3 типов трансформаторов показала:

- при учете знака корреляции коррелированы два соседних анализа, причем характер корреляции совпадает у всех пар анализов, а коэффициент корреляции R>0,6. У более удаленных анализов уровень корреляции заметно ниже, что позволяет считать их слабокоррелированными и из дальнейшего рассмотрения исключить;

- без учета знака корреляции (анализ модулей R) все анализы оказались со 100% корреляцией. Для контроли была рассчитана корреляционная матрица последовательностей по 19 анализам для одного из трансформаторов. Величина R оказалась более 0,3 для всех сочетаний пар анализов, что хорошо согласуется с предшествующим результатом.

Коррелированность по анализам в нормальном режиме хорошо объясняется: при нулевом (или малом) приращении концентраций рассматриваемая последовательность практически не изменяется, то есть мы рассчитываем не взаимокорреляционную матрицу двух последовательностей, а, практически, автокорреляционную матрицу одной.

Тем не менее, на основе полученных данных, уверенно говорить о сильной взаимосвязи допустимо лишь для соседних анализов.

Автокорреляционная матрица последовательности вида H_2, dH_2, dH_2/H_2_pred…..CO, dCO, dCO/CO_pred, vCO, усредненная по последним 5 анализам для каждого трансформатора, характеризуется следующими особенностями. Строгая периодичность максимумов и минимумов говорит о наличии связи (правда, относительно слабой) между отсчетами в сигнальной последовательности. Пренебрегать этой связью, даже при ее небольшой величине, нельзя, поскольку четко прослеживается ее периодический характер.

Это принципиально подтверждает результаты корреляционного анализа, полученные на предыдущих этапах. Различные величины коэффициентов корреляции свидетельствуют скорее о различиях в способах усреднения на анализируемом массиве, чем о противоречии между полученными данными.

Для трансформаторов ТДТН, ТРДН, ТДН была проведена оценка однородности последовательностей для последних 5 анализов по каждой паре соседних анализов (4 пары для каждого трансформатора). Тесты проводились на уровне значимости 0,05 с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Анализируемая последовательность содержала 28 отсчетов (H_2, dH_2, dH_2/H_2_pred, vH_2, CH_4 и т.д.). В итоге из всего объема данных, сформированных указанным способом, неоднородными оказалось:

ТДТН	6%	8,6%
ТРДН	2,5%	10%
ТДН	6,5%	1,3%

Проведенная оценка призвана выяснить тенденцию во временной изменчивости сигнальных последовательностей.

3.3. Частотные свойства изоляционных конструкций электроустановок.

Комплекс проведенных исследований показал целесообразность использования многочастотных методов для оценки состояния изоляционных конструкций различного электрооборудования [31, 44, 46, 48, 49-55 и др.]. Однако построение алгоритмов оценки состояния требуют анализа частотных свойств изоляции.

В общем случае при приложении переменного синусоидального напряжения через диэлектрик протекают следующие составляющие тока:

- емкостной ток, опережающий напряжение на 90° и обусловленный геометрической емкостью изоляции;

- ток абсорбции, обусловленный релаксационными поляризациями;

- сквозной ток проводимости.

Наличие тока абсорбции приводит к тому, что проводимость и емкость изоляции, измеренные на переменном токе, больше их значений, измеренных на постоянном токе. А сопротивление току утечки или току сквозной проводимости на постоянном (так называемое омическое сопротивление) оказывается больше чем на переменном токе.

Однако с повышением частоты приложенного напряжения релаксационные поляризации затухают и ток абсорбции исчезает. Характер изменения сопротивления изоляции и ее емкости на переменном токе от частоты приведен на рис. 3.2. Частота, на которой исчезают релаксационные поляризации, а сопротивление и емкость изоляции перестают зависеть от частоты, названа граничной частотой $f_г$.

Таким образом, на частотах ниже граничной (в том числе и на промышленной частоте) в изоляции будет протекать ток абсорбции, а на частотах выше или равной граничной этот ток отсутствует. При этом возможно представить изоляцию на частоте, большей граничной,

простейшей параллельной схемой замещения, состоящей из омического сопротивления изоляции и геометрической емкости изоляции (рис.3.3,а), а на частоте меньше граничной (близкой к 50 Гц) схема замещения будет дополнительно содержать параллельно включенное активное сопротивление току абсорбции и абсорбционную емкость (рис.3.4,а). На рис.3.3,б и рис.3.4,б представлены векторные диаграммы токов в изоляции на частотах больших и меньших граничной. На рис. 3.3 и рис. 3.4 приняты следующие обозначения:

U_{f1}, U_{f2} - напряжения, при которых определяются параметры изоляции на частотах больших и меньших граничной;

I_{f1}, $I_{\text{a}f1}$, $I_{\text{p}f1}$ - полный ток утечки через изоляцию на частоте большей граничной, его активная и реактивная составляющие;

I_{f2}, $I_{\text{a}f2}$, $I_{\text{p}f2}$ - то же на частоте меньшей граничной;

$I_{\text{см}f2}$ - ток смешения на частоте f_2;

$I_{\text{пр}f1}$, $I_{\text{пр}f2}$ - сквозной ток утечки;

$I_{\text{сг}f1}$, $I_{\text{сг}f2}$ - токи через геометрическую емкость изоляции;

R_{f1}, R_{f2}, C_{f1}, C_{f2} - активные сопротивления и емкости изоляции;

$R_{\text{ом}}$ - омическое сопротивление изоляции;

$R_{\text{абс}}$, $C_{\text{абс}}$ - активное сопротивление и емкость изоляции на частотах, определяющих абсорбционный ток;

$C_{\text{г}}$ - геометрическая емкость;

$R_{\text{из}f1}$, $C_{\text{из}f1}$, $R_{\text{из}f2}$, $C_{\text{из}f2}$ – активное сопротивление и емкость изоляции на частотах f_1 и f_2.

δ_{f1}, δ_{f2} - углы полных потерь;

δ''_{f1}, δ''_{f2} - углы омических потерь;

δ'_{f1}, δ'_{f2} - углы диэлектрических потерь;

ψ_{f2} - угол абсорбции.

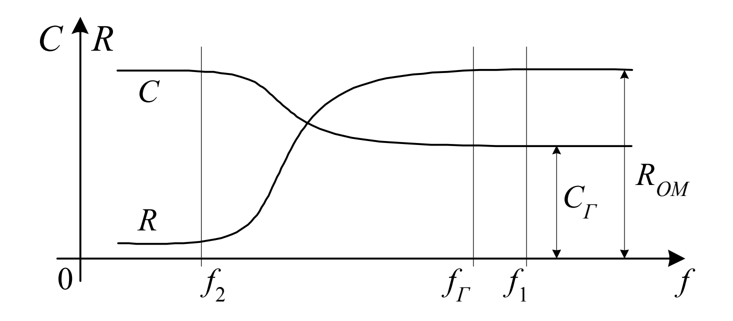
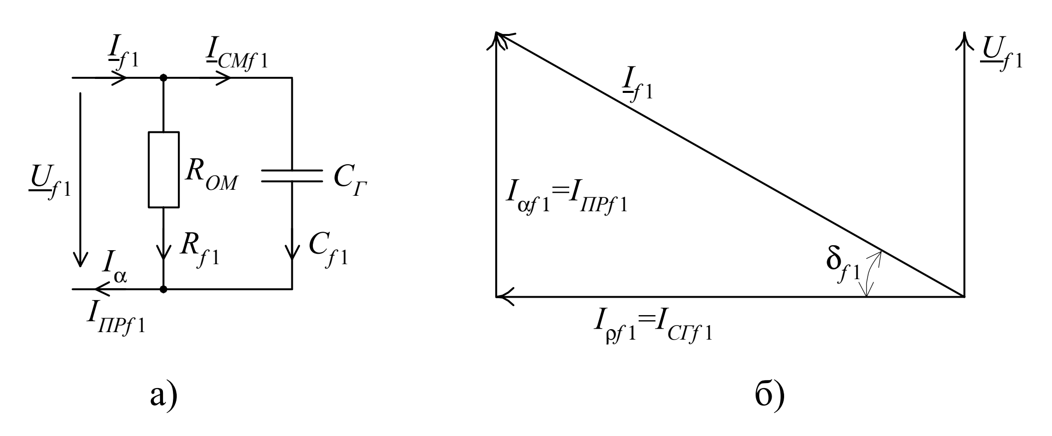


Рис. 3.2. Характер изменения емкости и сопротивления.



а) б)

Рис. 3.3. Схема замещения и векторная диаграмма на частотах выше граничной.

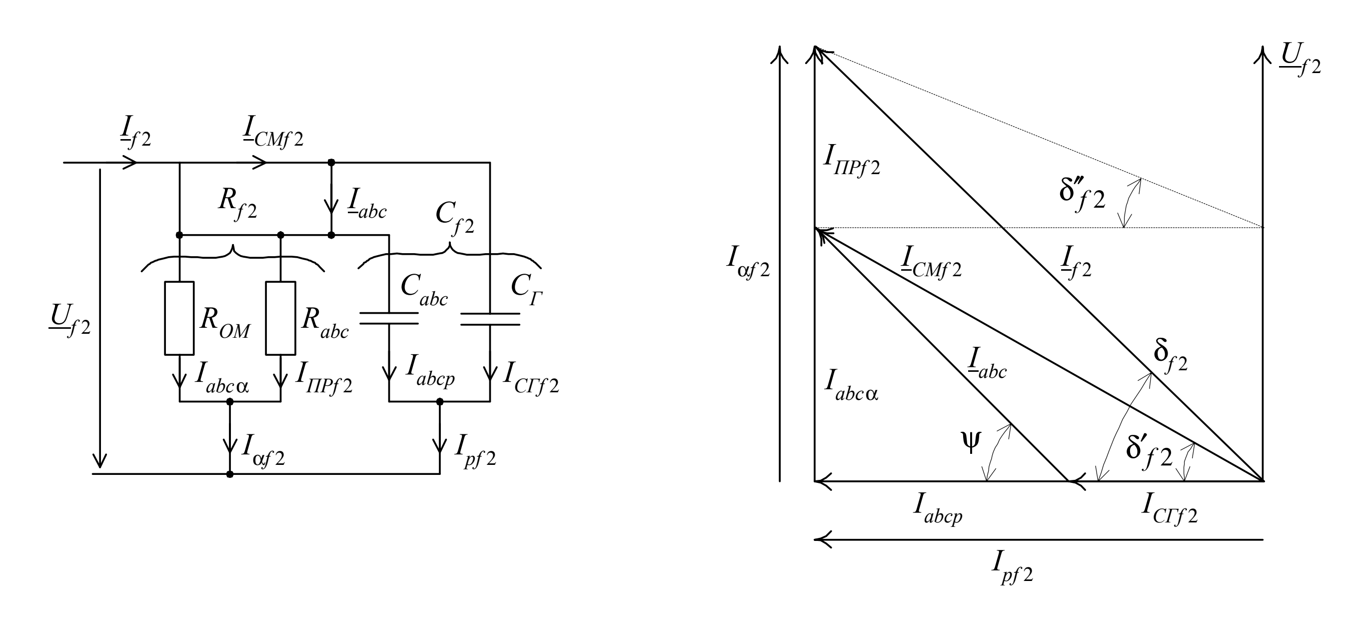


Рис. 3.4. Схема замещения и векторная диаграмма на частотах ниже граничной.

Приведенные схемы справедливы для простейших случаев однослойности изоляции. Дифференциальные уравнения для многослойной модели диэлектрика записывается в следующем виде:

$$j = \gamma_i E_i + \varepsilon_0 \varepsilon_i \frac{dE_i}{dt}, \quad i = 1,2,3,...,n \qquad (3.7)$$

$$U = s_j r_n + \sum_{i=1}^{n} E_i h_i$$

где i – номер слоя; n – количество слоев; E_i – напряженность в i–м слое; j – плотность полного тока; U – напряжение, приложенное к изоляционной конструкции; h_i, γ_i, ε_i – толщина, удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость i-го слоя.

Параметры эквивалентной схемы, в которой каждый слой представляет собой параллельно включенную емкость C_i и активное сопротивление R_i определяется выражениями:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i S}{h_i}; \quad R_i = \frac{h_i}{\gamma_i S}; \quad \tau_i = R_i C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{\gamma_i} \qquad (3.9)$$

где τ_i – постоянная времени релаксации i-го слоя.

Исходные дифференциальные уравнения для эквивалентной схемы имеют следующий вид:

$$I_м = \frac{Q_i}{\tau_i} + \frac{dQ_i}{dt}, \quad i=1,2,3\ldots, n;$$

(3.9)

$$U_м = r_м I_м + \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{C_i},$$

где Q_i – заряд на емкости C_i. Достаточно, очевидно, решить одну из систем уравнений, либо относящуюся к одной из систем уравнений, либо относящуюся к физической модели многослойного диэлектрика (3.8), либо соответствующую эквивалентной схеме (3.9). Будем решать систему (3.9).

Применяя преобразование Лапласа к (3.9), получим:

$$\tilde{I}_м \cdot \tau_i = (1 + p\tau_i)\tilde{Q}_i - \tau_i Q(0);$$
$$\tilde{U}_м = r_м \tilde{I}_м + \sum_{i=1}^{n} \frac{\tilde{Q}_i}{C_i}. \qquad (3.10)$$

Исключая $\tilde{Q}_i$ из (3.10), получаем вольтамперную характеристику в преобразованном по Лапласу виде:

$$\tilde{U}_м = \frac{\tilde{I}_м \left\{ r_м \prod_{i=1}^{n}(1 + p\tau_i) + \sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k \neq i}^{n}(1 + p\tau_k) \right\} + \sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k \neq i}^{n}(1 + p\tau_k) \cdot Q_i(0)}{\prod_{i=1}^{n}(1 + p\tau_i)}. \qquad (3.11)$$

Величина $r_м \ll R_i$, поэтому в первом приближении можно пренебречь сопротивлением $r_м$, решить задачу для условия $r_м=0$. Подставляя в (3.11) при $r_м=0$ для расчета тока зарядки

$$\tilde{U}_м = \frac{U_p}{p}; \quad Q_i^{зар}(0) = C_\Sigma \cdot U_p,$$

где $C_\Sigma = \left[\sum_{i=1}^{n} C_i^{-1} \right]^{-1}$, получаем:

$$\widetilde{I}_м^{зар} = U_p \frac{\prod_{i=1}^{n}(1+p\tau_i) - pC_\Sigma \sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k)}{p\sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k)}. \quad (3.12)$$

Характеристическое уравнение

$$\sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k) = 0 \quad (3.13)$$

имеет корни p_i, определяющие времена релаксации $v_i = \frac{1}{p_i}$ токовых характеристик.

После обратного преобразования Лапласа из (3.12) имеем:

$$I_м^{зар}(t) = \frac{U_p}{R_\Sigma}\left[1 - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\prod_{k=1}^{n}(v_i - \tau_k)}{v_i^2 \prod_{k\neq i}^{n-1}(v_i - v_k)} exp\left(-\frac{t}{v_i}\right)\right]. \quad (3.14)$$

Для расчета тока разрядки в (3.11) подставляются значения

$$\widetilde{U}_м = 0; \quad Q_i^{рез}(0) = U_p \frac{\tau_i - \tau_\Sigma}{R_\Sigma},$$

где $$R_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} R_i; \quad \tau_\Sigma = R_\Sigma C_\Sigma.$$

В результате получаем:

$$\widetilde{I}_м^{рез} = -\frac{U_p}{R_\Sigma} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i(\tau_i - \tau_\Sigma) \cdot \prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k)}{\sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k)}. \quad (3.15)$$

Применяя к (3.15) обратное преобразование Лапласа, найдем

$$I_{м}^{зар}(t)=\frac{U_p}{R_\Sigma}\cdot\sum_{i=1}^{n-1}\frac{\prod_{k=1}^{n}(v_i-\tau_k)}{v_i^2\prod_{k\neq i}^{n-1}(v_i-v_k)}exp\left(-\frac{t}{v_i}\right)=-\left(I_{м}^{зар}(t)-I_{м}^{зар}\right), \qquad (3.16)$$

где $$I_{м}^{скв}=\frac{U_p}{R_\Sigma}.$$

При расчете напряжения саморазряда $U_{с}(t)$ после полной зарядки, подставляя в (3.11) начальные условия

$$\widetilde{I}_{м}=0; \quad Q_i^c(0)=U_p\frac{\tau_i}{R_\Sigma},$$

получаем $$\widetilde{U}_{м}^{c}=U_p\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n}R_i\tau_i\cdot\prod_{k\neq i}^{n}(1+p\tau_k)}{R_\Sigma\prod_{i=i}^{n}(1+p\tau_i)}. \qquad (3.17)$$

В результате решения характеристического уравнения

$$R_\Sigma\prod_{i=i}^{n}(1+p\tau_i)=0 \qquad (3.18)$$

определяются времена релаксации $\tau_i=-\frac{1}{p_i}$.

После обратного преобразования Лапласа из (3.17) получаем:

$$U_{м}^{c}(t)=U_p\sum_{i-1}^{n}\frac{R_i}{R_\Sigma}\cdot exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \qquad (3.19)$$

При расчете восстановленного напряжения $U_в(t)$ после полной зарядки, подставляя в (3.11) начальные условия

$$\widetilde{I}_м = 0; \quad Q_i^в(0) = \frac{U_p}{R_\Sigma}(\tau_i - \tau_\Sigma),$$

получаем:

$$\widetilde{U}_м^в = U_p \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i(\tau_i - \tau_\Sigma)\cdot\prod_{k\neq i}^{n}(1 + p\tau_k)}{R_\Sigma \prod_{i=i}^{n}(1 + p\tau_i)}. \qquad (3.20)$$

После обратного преобразования Лапласа из (3.20) находим:

$$U_м^в(t) = U_p \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{R_\Sigma}\left(1 - \frac{\tau_\Sigma}{\tau_i}\right) exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \qquad (3.21)$$

Итак, получены расчетные формулы (3.14), (3.16), (3.19), (3.21) для абсорбционных характеристик $I_{зар}(t)$, $I_{рез}(t)$, $U_с(t)$, $U_в(t)$ для эквивалентной схемы, соответствующей многослойной модели диэлектрика, без учета сопротивления подводящих проводов и электродов $r_м$. Времена релаксации v_i и τ_i определяются характеристическими уравнениями (3.13), (3.18).

Если учесть сопротивление $r_м$, то выражения (3.19), (3.21) останутся без изменения, а для токовых характеристик изменяются только времена релаксации, поскольку характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$r_м \cdot \prod_{i=1}^{n}(1 + p\tau_i) + \sum_{i=1}^{n}(1 + p\tau_k) = 0. \qquad (3.22)$$

Определив из (3.22) новые времена релаксации $\Theta_i = -\frac{1}{p_i}$ и подставив их в (3.14), (3.16) вместо v_i, получаем выражения $I_м^{зар}(t)$, $I_м^{рез}(t)$ для схемы Максвелла с учетом сопротивления $r_м$.

Частотную характеристику эквивалентной схемы (с учетом $r_м$) нетрудно получить, пользуясь символическим методом

$$\dot{Z}(\omega) = r_м + \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{1 + i\omega\tau_i} = r_м + \sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{1 + \omega^2\tau_i^2} - i\sum_{i=1}^{n} \frac{R_i\omega\tau_i}{1 + \omega^2\tau_i^2} = Z_a - iZ_c, \quad (3.23)$$

где $Z_а$, Z_c – активная и реактивная составляющие комплектного сопротивления.

В таком случае комплексная проводимость

$$\dot{Y}_м(\omega) = \frac{1}{Z_a - iZ_c} = \frac{Z_a}{Z_a^2 + Z_c^2} + i\frac{Z_c}{Z_a^2 + Z_c^2} = i\omega C_0(\varepsilon' - i\varepsilon'') \quad (3.24)$$

где $C_0 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_м S}{h}$ - безынерционная (высокочастотная) емкость, ε' и ε'' - эффективные значения вкладов в диэлектрическую проницаемость и фактор потерь, обусловленных абсорбционными явлениями.

Из (3.23), (3.24) следует:

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{1}{Z_a^2 + Z_c^2}\sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_0} \cdot \frac{R_i^2}{1 + \omega^2\tau_i^2};$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{1}{\left(Z_a^2 + Z_c^2\right)\omega C_0}\left\{\sum_{i=1}^{n} \frac{R_i}{1 + \omega^2\tau_i^2} + r_м\right\}; \quad (3.25)$$

$$tg\delta = \frac{Z_a}{Z_c} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i \prod_{k\neq i}^{n}(1 + \omega^2\tau_k^2) + r_м \prod_{i=1}^{n}(1 + \omega^2\tau_i^2)}{\sum_{i=1}^{n} R_i\omega\tau_i \cdot \prod_{k\neq i}^{n}(1 + \omega^2\tau_k^2)}.$$

Итак, получены выражения для частотных характеристик эквивалентной схемы, соответствующей многослойному диэлектрику (с учетом $r_м$) – выражение для $\dot{Z}_м$ (2.27), $\dot{Y}_м(\omega)$ (2.28), $\varepsilon'(\omega)$, $\varepsilon''(\omega)$, $tg\delta(\omega)$ (3.25).

Рассмотрим изменения свойств многослойной изоляции при воздействии увлажнения.

С учетом плотности тока напишем систему уравнений для многослойной изоляции с некоторым *i*-ым увлажненным слоем. Учтем при этом влияние дистиллята. Для этого добавим дополнительное уравнение

$$(\gamma_1 + \omega\varepsilon_0\varepsilon_1 tg\delta_1)E_1 + \varepsilon_0\varepsilon_1\frac{dE_1}{dt} = (\gamma_n + \omega\varepsilon_0\varepsilon_n tg\delta_n)E_n + \varepsilon_0\varepsilon_n\frac{dE_n}{dt}$$

....

$$(\gamma_{i_в} + \omega\varepsilon_0\varepsilon_{i_в} tg\delta_{i_в})E_{i_в} + \varepsilon_0\varepsilon_{i_в}\frac{dE_{i_в}}{dt} = (\gamma_n + \omega\varepsilon_0\varepsilon_n tg\delta_n)E_n + \varepsilon_0\varepsilon_n\frac{dE_n}{dt} \quad (3.26)$$

....

$$(\gamma_{n-1} + \omega\varepsilon_0\varepsilon_{n-1} tg\delta_{n-1})E_{n-1} + \varepsilon_0\varepsilon_{n-1}\frac{dE_{n-1}}{dt} = (\gamma_n + \omega\varepsilon_0\varepsilon_n tg\delta_n)E_n + \varepsilon_0\varepsilon_n\frac{dE_n}{dt}$$

$$J_д = \dot{\gamma}_д U + \varepsilon_д\varepsilon_0\frac{dU}{dt}$$

где $\gamma_{i_в}, \varepsilon_{i\,в}, tg\delta_{i_в}$ - проводимость, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь *i*-го увлажненного слоя, $\gamma_д, \varepsilon_д, tg\delta_д$ - тоже для дистиллята.

Дополнить эту систему можно уравнением

$$d_1E_1(t) + d_2E_2(t) + \ldots + d_{i_в}E_{i_в} + \ldots + d_nE_n(t) = U$$

Проведя преобразования, получаем систему (3.27), которая является комплексным аналогом системы (3.26)

$$\|A\|\frac{d\bar{\varepsilon}_m}{dt}+\|B\|\bar{\varepsilon}_m=\overline{U}_1 \qquad (3.27)$$

где $\bar{\varepsilon}_m$ - вектор комплексных амплитуд напряженностей электрического поля в слоях изоляции; $\frac{d\bar{\varepsilon}_m}{dt}$ - вектор производных от комплексных амплитуд, U_1 – вектор свободных членов, имеющий $(n–1)$ равную $U_n U_m$; $\|A\|$ - матрица коэффициентов при производных.

$$a_{ji}=\begin{cases}\varepsilon_0(\varepsilon_n d_i+\varepsilon/g) & при\ i\neq j;\\ \varepsilon_0(\varepsilon_n d_i+\varepsilon_n d_i+\varepsilon/g) & при\ i=j;\end{cases}$$

$\|B\|$ - матрица коэффициентов при неизвестном векторе ε_m, подлежащем определению

$$b_{ji}=\begin{cases}\gamma_n d_i+\gamma/d & при\ i\neq j\\ \gamma_n d_i+\gamma_i d_n+\gamma/d & при\ i=j\end{cases}$$

Общее решение неоднородной системы (3.27) равно сумме общего решения однородной системы:

$$\|A\|\overline{\frac{d\varepsilon_m}{dt}}+\|B\|\bar{\varepsilon}_m=0 \qquad (3.28)$$

и частного решения неоднородной системы (3.27).

Общее решение характеризует переходный процесс. Мы исследуем характеристики установившегося режима, который характеризует частное решение системы.

В установившемся режиме $\overline{\frac{d\varepsilon_m}{dt}} = 0$ (ток как процесс накопления свободных зарядов на поверхности раздела закончен), и частное решение должно удовлетворять системе линейных алгебраических уравнений $B\bar{\varepsilon}_m = \overline{U_1}$. Отсюда частное решение может быть получено в виде $\bar{\varepsilon}_m = \|B\|^{-1}\overline{U_1}$. Можно, однако, получить частное решение непосредственно из системы уравнений Максвелла с учетом того, что в установившемся режиме $\left(\frac{dE_{mi}}{dt} = 0\right)$, тогда $v_m = \dot{\gamma}_i E_{mi}$. Выполняя преобразования, получим:

$$E_{mi} = \frac{U_m}{\dot{\gamma}_i \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\dot{\gamma}_i}} \tag{3.29}$$

$\dot{\gamma}_i$ - комплексная проводимость;

$$\dot{\gamma}_i = \gamma_i + \gamma_\partial + \omega\varepsilon_0(\varepsilon_i tg\delta_i + \varepsilon_\partial tg\delta_\partial) + j\omega\varepsilon_0(\varepsilon_i + \varepsilon_\partial)$$

Таким образом, выражение (3.29) дает комплексные амплитуды напряженностей электрического поля в слоях при установившемся режиме. Тогда для плотности тока, протекающего через многослойный диэлектрик в установившемся режиме, получаем:

$$J_m = \dot{\gamma}_i E_{mi} = \frac{U}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\gamma_i}}; \qquad J = J_m + J_\partial = \frac{U}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\gamma_i}} + \gamma_\partial U \tag{3.30}$$

Таким образом, если ввести фиктивный однородный диэлектрик, который бы обеспечивал при приложении синусоидального напряжения с амплитудой U_m плотность тока J_m, получаемую из (3.30), можно определить зависимость от частоты диэлектрической проницаемости $\varepsilon_э$ и тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta_э$ однородного диэлектрика, эквивалентного многослойной структуре. Плотность тока, протекающего через эквивалентный диэлектрик, имеющий проводимость $\dot{\gamma}_э$, равна $J_m = \dot{\gamma}_э E_{mэ}$. В однородном диэлектрике (той же толщины, что и многослойный)

$$E_{mэ} = \frac{U_m}{\sum\limits_{i=1}^{n} d_i}, \text{ откуда } \dot{\gamma}_э = \frac{J}{U_m}\sum_{i=1}^{n} d_i .$$

Подставляя вместо J_m его значение из (3.30), имеем:

$$\dot{\gamma}_э = \left(\sum_{i=1}^{n} d_i + \gamma_д \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\gamma_i}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\dot{\gamma}_i}\right)^{-1} .$$

Учитывая, что $\dot{\gamma}_э = \gamma_э + \omega\varepsilon_0\varepsilon_э tg\delta_э + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_э$, получим

$$\varepsilon_э = \mathrm{Im}\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} d_i}{\omega\varepsilon_0 \sum\limits_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\dot{\gamma}_i}} \quad \text{и} \quad tg\delta_э' = \frac{\mathrm{Re}\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\dot{\gamma}_i}}{\mathrm{Im}\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\dot{\gamma}_i}},$$

причем $tg\delta_э' = tg\delta_э + \frac{\gamma_э}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_э}$. Здесь $\gamma_э$ – эквивалентная проводимость эквивалентного однородного диэлектрика на постоянном напряжении, $tg\delta_э'$ - тангенс угла диэлектрических потерь эквивалентного однородного

диэлектрика без учета потерь проводимости; $tg\delta_э$ – тоже с учетом потерь проводимости.

Так, по известным ε_i и $tg\delta_i$ слоем, входящих в состав многослойного диэлектрика, определяются эквивалентные $\varepsilon_э$ и $tg\delta_э$ на переменном напряжении при разных частотах.

Проведенный анализ позволил разработать комплекс технических решений, позволяющих повысить совершенство методов и технических средств оценки состояния энергетического оборудования.

В качестве примера приведем способ определения состояния изоляции блоков генератор-трансформатор с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора. Схема замещения цепи с непосредственным охлаждением приведена на рис. 3.6,а. В отличие от схемы, приведенной на рис. 3.4, здесь показаны сопротивление R_0 и емкость C_0 системы охлаждения.

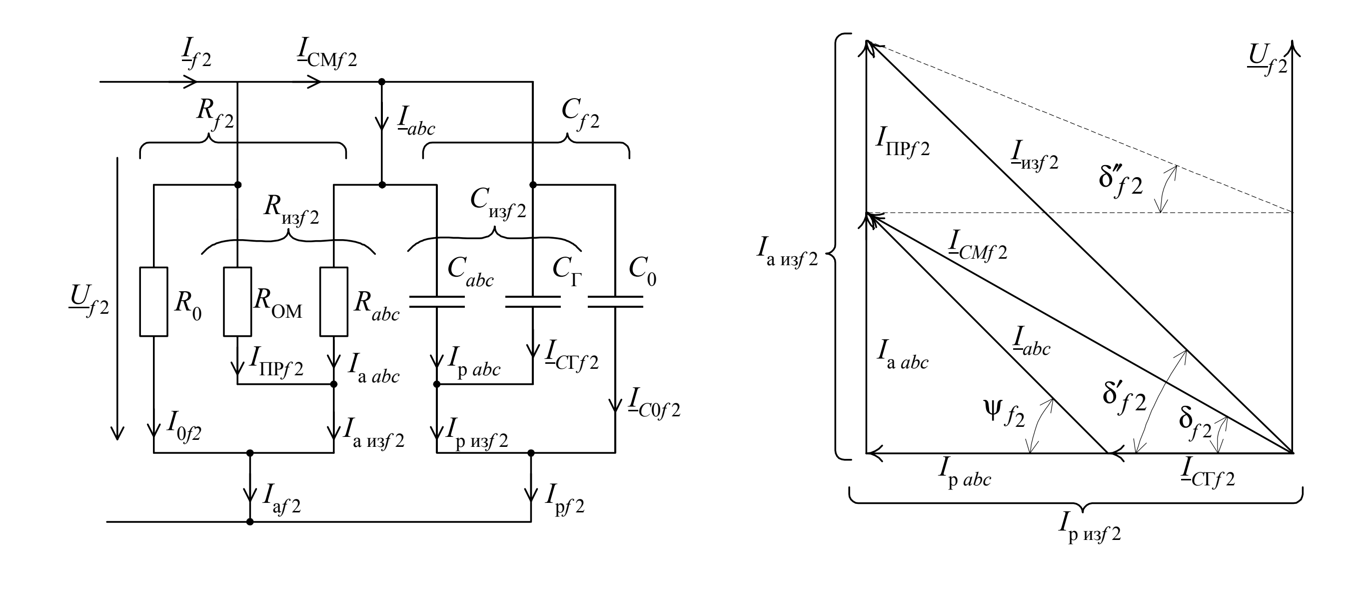
Низкочастотные поляризации вызывают неравенство $R_{ом}$ и $R_{из}$ на промышленной частоте, но при частотах в несколько сот Герц низкочастотные поляризации затухают, при этом $R_{ом}=R_{из}$ и не зависит в дальнейшем от частоты. На частотах в несколько сот Герц $C_{из}$=const и не зависит от частоты, поэтому $C_{из}$ равна $C_г$ при частоте 50 Гц, а C_{abc} равна нулю. Если проводить измерения параметров изоляции на частоте $f_1 \geq f_н$, то $R_{из}$ и $C_{из}$ не зависят от частоты.

Упрощенная конструкция обмотки статора с водяным охлаждением представлена на рис. 3.6,б. Здесь введены следующие обозначения:

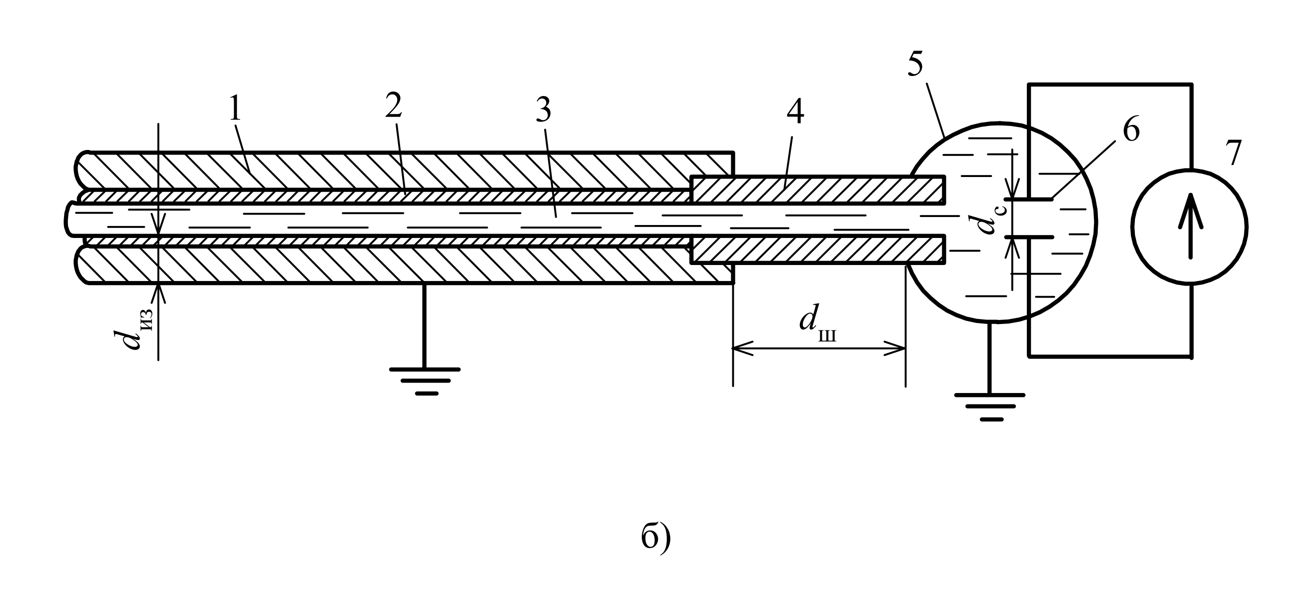
1 - стальной сердечник статора;

2 - полые медные проводники;

3 - каналы внутри проводников, по которым циркулирует охлаждающая вода;



а)



б)

Рис. 3.6. Схема замещения изоляции блока генератор-трансформатор с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора и векторная диаграмма токов и напряжений (а); часть обмотки статора синхронного генератора с непосредственным водяным охлаждением (б).

4 - фторопластовые шланги;

5 - напорный коллектор;

6 - электроды солемера;

7 - источник тока солемера.

Емкость изоляции генератора $C_г$ в первом приближении как суммарная емкость параллельно включенных конденсаторов, обкладками каждого из которых являются проводящие стержни обмотки и стальной корпус статора, между которыми располагается слой изоляции толщиной $d_{из}$. Емкость системы охлаждения C_0 определяется как суммарная емкость параллельно включенных конденсаторов, образованных торцами токоведущих стержней 2 и коллектором 5, изоляцией между которыми служат водопроводящие шпанги 4, длина которых $d_ш$. Так как $C \sim \frac{1}{d}$, а размеры генератора таковы, что $d_ш \gg d_{из}$, то $C_0 \ll C_{из}$, соответственно можно пренебречь токами $\dot{I}_{C0f_1}$ и $\dot{I}_{C0f_2}$.

Величину R_0 можно определить, зная удельное сопротивление воды и размеры системы охлаждения. Площадь электродов солемера $S_с$=1 см^2, а расстояние между ними $l_с$=1 см. активное сопротивление охлаждающей воды определяется по формуле

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} \frac{1}{n},$$

где l, S, n - длина, площадь сечения, количество водопроводящих шлангов в системе охлаждения; $\rho = U_7 \cdot I_с^{-1}$ - удельная проводимость охлаждающей воды; U_7 - напряжение на выводах источника 7 солемера; $I_с$ - ток, измеренный между электродами солемера.

Измерив $\dot{I}_{af_1}$, $\dot{I}_{af_2}$, $\dot{U}_{af_1}$, $\dot{U}_{af_2}$ и R_0 найдем $R_{ом}$

$$R_{\text{ом}} = R_0 \ R_{f_1} \, (R_0 - R_{f_1}) ,$$

где $R_{f_1} = U_{f_1} \cdot I^{-1}_{\text{а}f_1}$; $R_{f_2} = U_{f_2} \cdot I^{-1}_{\text{а}f_2}$.

Аналогично определим R_{abc} и C_{abc}

$$R_{abc} = R_{f_1} \cdot R_{f_2} \, (R_{f_1} - R_{f_2})^{-1};$$

$$C_{abc} = C_{f_2} - C_{f_1} ,$$

где $C_{f_1} = I_{\text{р}.f_1} \cdot (2\pi f_1 U_{f_1}) - 1$;

$C_{f_2} = I_{\text{р}.f_1} \cdot (2\pi f_2 U_{f_2}) - 1$.

На основании векторной диаграммы определяются значения тангенса угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg}\Psi_{f_2} = I_{\text{а}.abc} \cdot I^{-1}_{\text{р}.abc} = (2\pi f_2 \cdot C_{abc} \cdot R_{abc})^{-1};$$

$$\operatorname{tg}\delta_{f_1} = (R_{\text{ом}} \cdot C_{f_1} \cdot 2\pi f_1)^{-1};$$

$$\operatorname{tg}\delta'_{f_2} = \operatorname{tg}\Psi_{f_2} \cdot C_{abc} \cdot C_{f_2} ;$$

$$\operatorname{tg}\delta''_{f_2} = \operatorname{tg}\delta_{f_1} \cdot f_1 \cdot C_{f_1} \cdot (f_2 \cdot C_{f_2})^{-1}.$$

Операция определения состояния изоляции осуществляется сравнением определенного на частоте f_2 тангенса угла полных потерь $\operatorname{tg}\delta_{f_2} = \operatorname{tg}\delta'_{f_2} + \operatorname{tg}\delta''_{f_2}$. Если $\operatorname{tg}\delta_{f_2}$ не изменится, то диэлектрические свойства не нарушены. Если $\operatorname{tg}\delta_{f_2}$ увеличится и при этом увеличится $\operatorname{tg}\delta''_{f_2}$,

то состояние изоляции ухудшилось за счет появления токоведущих мостиков вследствие увлажнения. Если $\mathrm{tg}\,\delta_{f2}$ вырос при $\mathrm{tg}\,\delta''_{f2}$ близком к нулю, то состояние ухудшилось за счет старения изоляции.

Рассмотренные способы были апробированы в экспериментальных условиях, которые подтвердили высокую эффективность предлагаемых алгоритмов.

Реальные контролируемые электроустановки представляют сочетание нескольких элементов, что требует дополнительного анализа. Наиболее распространенным вариантом схемы является сочетание кабеля с включенной на конце электрической машиной (двигатель, трансформатор, реактор).

В системе кабель – электродвигатель кабель замещается цепной схемой из *n* П-образных звеньев и нагружается на входное частотно-зависимое сопротивление электродвигателя (рис. 3.7,а), двигатель – цепной схемой из *m* – 1 П-образных звеньев (рис. 3.7,б). В диапазоне частот от 2 до 500 кГц структура цепной схемы замещения электродвигателя сохраняется постоянной, на зависимость ее параметров от частоты не накладывается никаких ограничений, а величина этих параметров для заданной частоты однозначно определяется входными сопротивлениями элементов данной схемы и определяется экспериментальным путем.

Для схемы рис. 3.7,а можно составить следующие дифференциальные уравнения для разностей токов в узлах и напряжений между соседними узлами:

$$-i_1 = \frac{C_к}{2}\frac{dU_1}{dt} + U_1\left(\frac{G_к}{2} + \frac{1}{Z_л}\right) - \frac{U_{вх}}{Z_л};$$

$$i_1 - i_2 = C_к\,\frac{dU_2}{dt} + U_2 G_к;$$

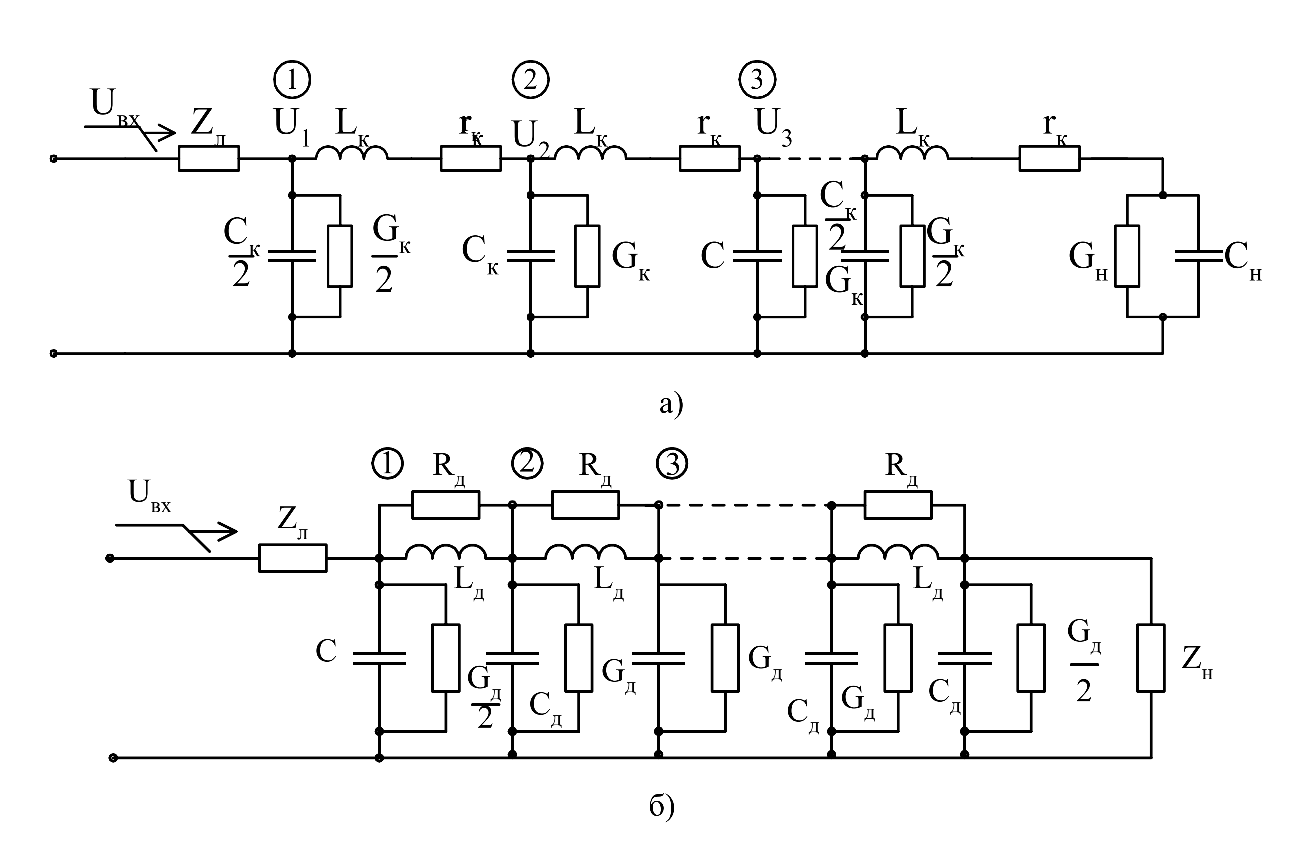


Рис. 3.7. Цепная схема системы кабель – электродвигатель:

а) кабель;

б) двигатель.

$$i_{j-2} - i_{j-1} = C_к \frac{dU_{j-1}}{dt} + U_{j-1} G_к ;$$

$$i_{n-1} = \frac{G_к}{2} \frac{dU_n}{dt} + U_n (G_к + y) ;$$

$$U_1 - U_2 = L_к \frac{di_1}{dt} + r_к i_1 ;$$

$$U_{n-1} - U_n = L_к \frac{di_{n-1}}{dt} + r_к i_{n-1} ,$$

Аналогично составлены дифференциальные уравнения для схемы рис. 3.7,б:

$$- i_1 = \frac{C_д}{2} \frac{dU_1}{dt} + U_1 (\frac{G_д}{2} + \frac{1}{R_д} + \frac{1}{Z_л}) - U_2 / R_д - \frac{U_{вх}}{Z_л} ;$$

$$i_1 - i_2 = C_д \frac{dU_2}{dt} - \frac{U_1}{R_д} + U_2 (G_д + \frac{2}{R_д}) - \frac{U_3}{R_д} ;$$

$$i_{j-2} - i_{j-1} = C_д \frac{dU_{j-1}}{dt} - \frac{U_{j-2}}{R_д} + U_{j-1} (G_д + \frac{2}{R_д}) - \frac{U_j}{R_д} ;$$

$$i_m = \frac{C_д}{2} \frac{dU_m}{dt} - \frac{U_{m-1}}{R_д} + U_m (\frac{G_д}{2} + \frac{1}{r_д} + Y_н) ;$$

$$U_1 - U_2 = Ld \frac{di_1}{dt} ;$$

$$U_{m-1} - U_m = Ld\,\frac{di_{m-1}}{dt},$$

где j = 4, 5…, m; r, L, C и G – параметры двигателя и кабеля, обозначенные соответствующими индексами.

Для нахождения потенциалов в узлах схемы за основу принимаем частотный метод расчета, являющийся частным случаем операторного метода расчета, когда $p = j\omega$. Тогда для схем рис. 3.7,а и 3.7,б системы дифференциальных уравнений в матричной форме принимают вид:

$$D_1 \cdot I(\omega) = j\omega C U(\omega) + W \cdot U(\omega) - U_{вх}(\omega)/Z_л; \quad (3.31)$$

$$D_2 \cdot U(\omega) = j\omega L\, I(\omega) + R \cdot I(\omega); \quad (3.32)$$

$$D_1 \cdot I(\omega) = j\omega C\, U(\omega) + W\, U(\omega) - U_{вх}(\omega) / Z_л; \quad (3.33)$$

$$D_2 \cdot U(\omega) = j\omega L\, I(\omega), \quad (3.34)$$

где D_1 и D_2 – служебные матрицы;

$I(\omega)$ – вектор комплексов токов;

$U(\omega)$ – вектор напряжений в узлах;

C – диагональная матрица емкостей;

L – диагональная матрица индуктивностей;

W – трех диагональная матрица;

$Z_л$ – входное сопротивление линии или генератора импульсов;

R – диагональная матрица, характеризующая продольное активное сопротивление кабеля;

$U_{вх}(\omega)$ – частотная характеристика входного воздействия.

Находя из (3.34) и (3.34) вектор тока и подставив в (3.31) и (3.33), соответственно, получим:

$$U(\omega) = A(\omega)\,\frac{1}{Z_л}\cdot U_{вх}(\omega); \qquad (3.35)$$

$$A(\omega) = (W - j\omega C - D_1 Z^{-1} D)^{-1}; \qquad (3.36)$$

$$A(\omega) = (W - j\omega C - \frac{1}{j\omega} D_1 L^{-1} D_2)^{-1} \qquad (3.37)$$

для рис. 3.7,а и 3.7,б соответственно, причем в (3.36) Z – диагональная матрица комплексного продольного сопротивления кабеля.

Выражение (3.35) представляет собой систему из n или m уравнений для n или m неизвестных напряжений и токов, а выражения (3.36) и (3.37) – матричные частотные характеристики передачи.

Зная частотную характеристику входного воздействия $U_{вх}(\omega)$, можно легко определить частотные характеристики напряжений в узлах эквивалентной схемы. Используя преобразования Фурье, можно получить искомые потенциалы в функции времени в виде:

$$U(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} Re\left[U(\omega)\right]\frac{\sin\omega t}{\omega}\,d\omega, \qquad (3.38)$$

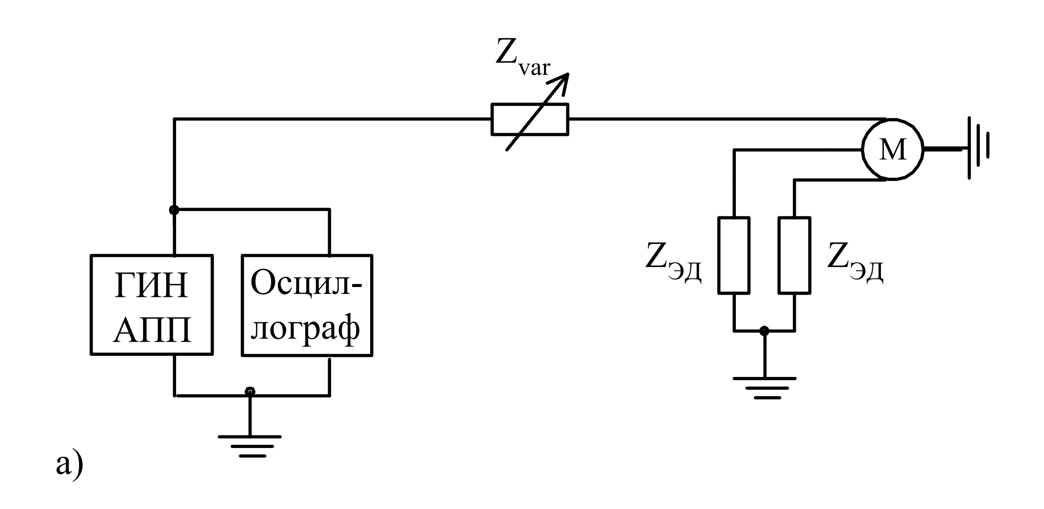
где $Re\,[U(\omega)]$ – столбец вещественных частей частотных характеристик потенциалов в узлах схемы в функции времени.

Практически определение $U(t)$ выполняется при следующей последовательности: 1) по входным частотным характеристикам элементов электроснабжения для ряда частот в соответствии с выражениями, приведенными выше, определяются параметры схемы замещения; 2) для этих же частот рассчитываются A (ω); 3) вычисляется частотная характеристика входного воздействия $U_{вх}$ (ω) и определяется U (ω); 4) в соответствии с (3.38) вычисляются U (t) в узлах схемы численным интегрированием.

На рис. 3.8 и 3.9 приведены схемы измерения сопротивлений электродвигателей и трансформаторов соответственно. При измерениях этих параметров электродвигателей и трансформаторов «свободные» фазы исследуемой обмотки и обмоток других классов напряжения согласовывались через соответствующие сопротивления ($Z_{ЭД}$ на рис. 3.8,а и Z_T, Z – на рис. 3.9).

Результаты измерения сопротивлений одной (Z_1) и трех фаз (Z_3) электродвигателей сведены в таблицу 3.7. Величины Z_1 и Z_3 для электродвигателей 6 – 10 кВ компрессорных и насосных станций и 0,4 кВ станков-качалок приведены в таблице 3.8.

На рис. 3.10 в качестве примера предоставлены частотные характеристики погружных электродвигателей. Аналогичные характеристики получены для кафелей, систем кабель-двигатель, кабель-трансформатор [13, 29, 31]. Полученные характеристики позволяют сформулировать исходные требования к системам автоматизированного контроля [40, 50, 52 и др.].



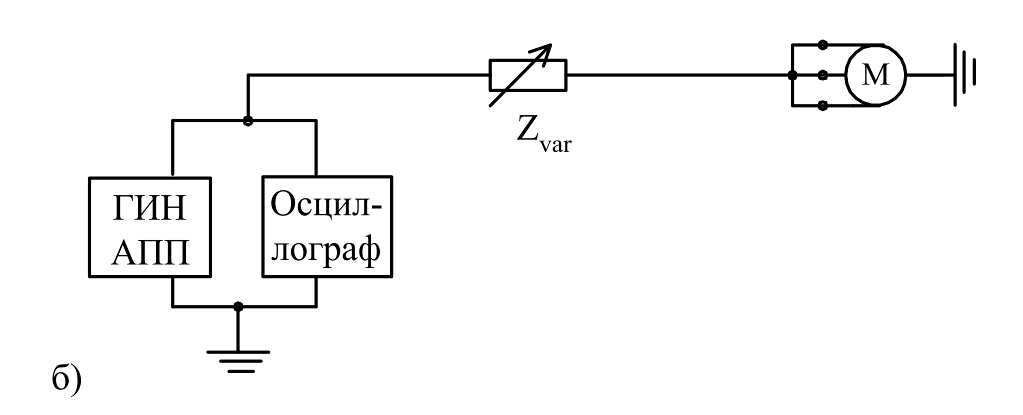
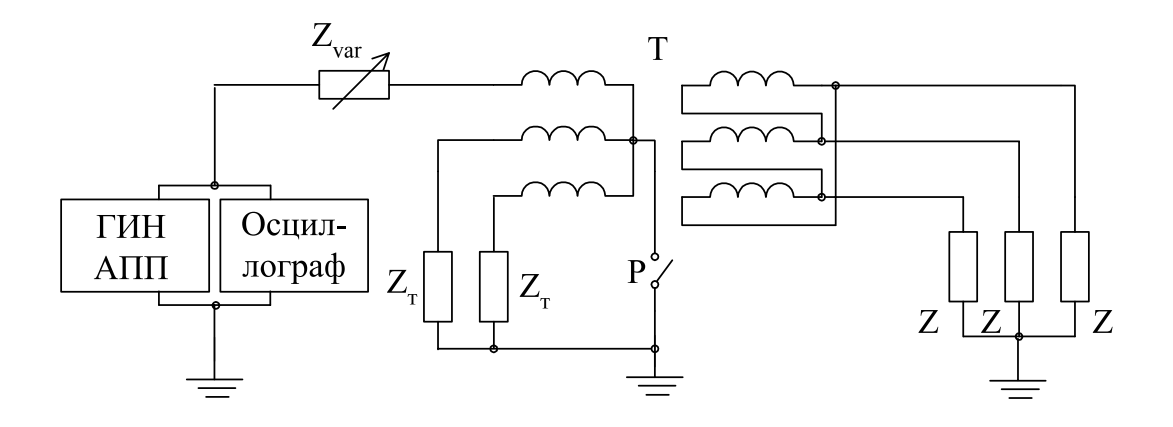
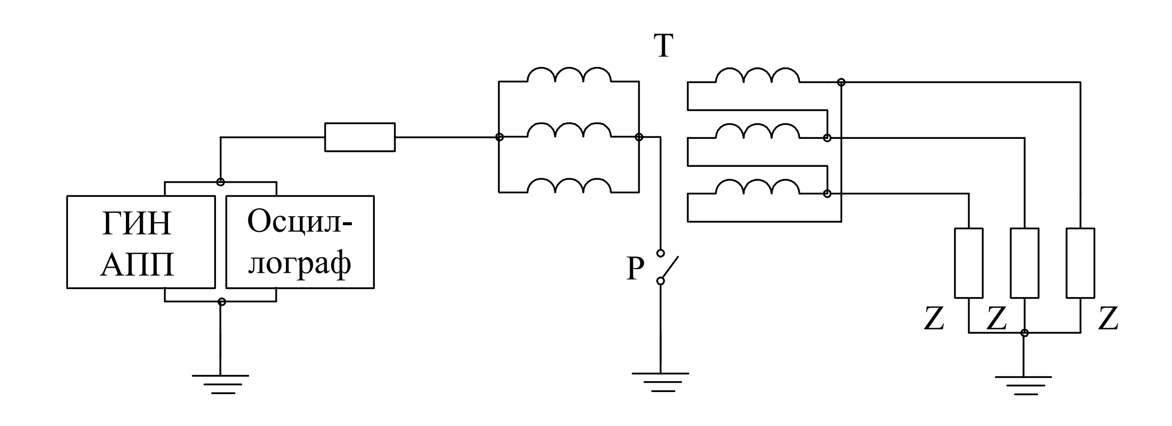


Рис. 3.8. Измерение волновых сопротивлений одной (а) и трех фаз (б) электродвигателей.



а)



б)

Рис. 3.9. Измерение волновых сопротивлений одной (а) и трех фаз (б) трансформаторов.

Таблица 3.7.

Результаты измерения Z_1 и Z_3 для электродвигателей

Тип электродвигателя	$Z_{1\,A}$, Ом	$Z_{1\,B}$, Ом	$Z_{1\,C}$, Ом	Z_3, Ом
ПЭД – 32 – 103	1800	1800	1800	650
ПЭДУ – 32 – 103	1200	1200	1200	410
ПЭДУ – 45 – 117	1900	1900	1900	650
ПЭДУ – 63 – 320	1350	1350	1350	500
ПЭДУ – 90 – 123	1000	1000	1000	350
ПЭДС – 90	1200	1200	1200	450

Таблица 3.8.

Значения Z_1 и Z_3 для электродвигателей 0,4 ÷ 10 кВ

Класс напряжения, кВ	$\overline{Z}_1$,Ом	$\overline{Z}_3$, Ом
0,4	1100	400
6	1600	550
10	1500	510

Таблица 3.9.

Значения Z_1 и Z_3 для силовых трансформаторов

Класс напряжения, кВ	$\overline{Z}_1$	$\overline{Z}_3$
6	1200	500
10	1400	550
35	1800	710
110	1900	810
220	2400	920

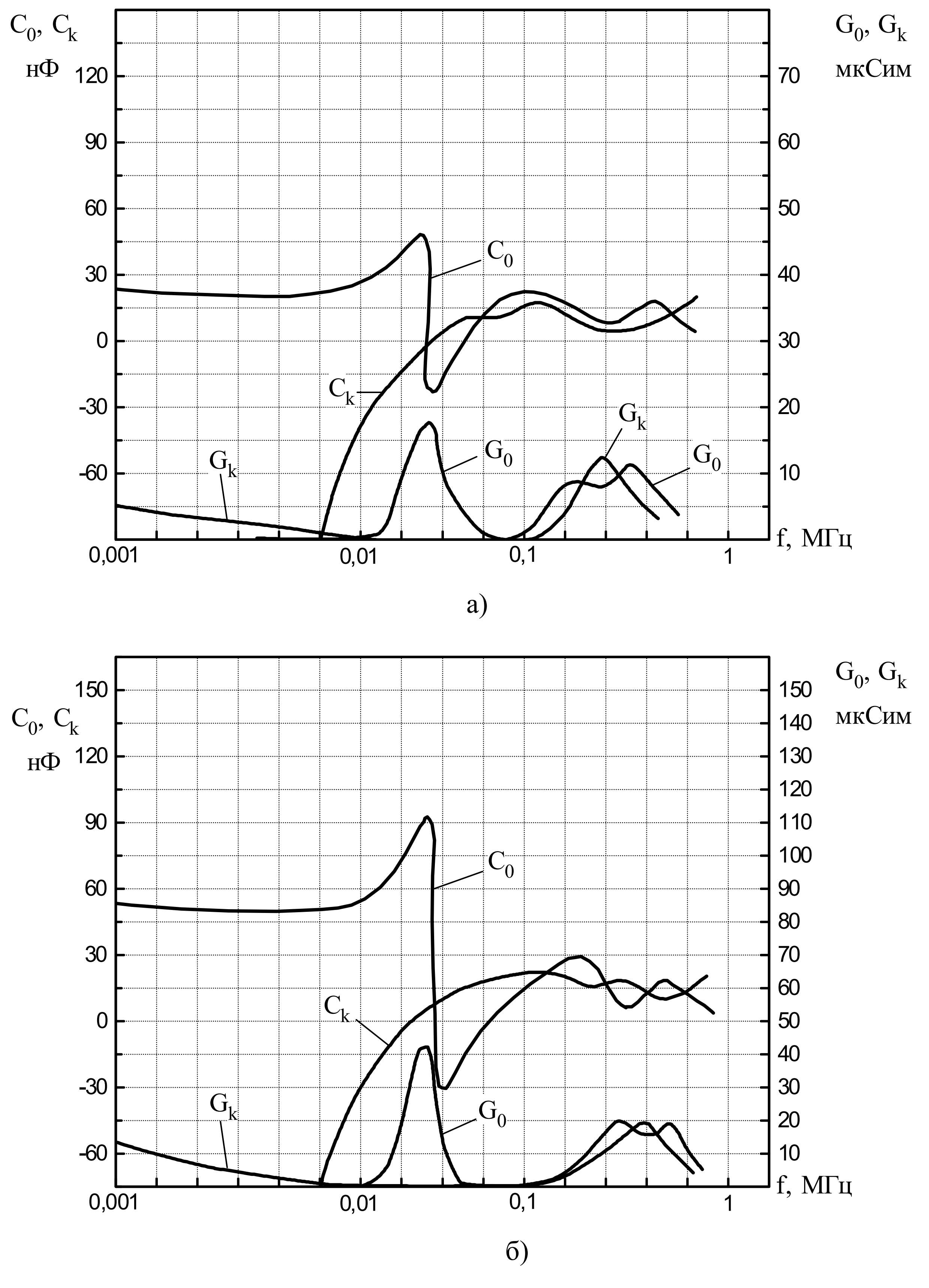


Рис. 3.10. Частотные характеристики в режимах холостого хода и короткого замыкания: а) трех фаз; б) одной фазы.

3.4. Анализ характеристик частичных разрядов

Частичные разряды (ЧР), возникающие во включениях , являются одним из определяющих факторов в процессе старения и пробоя внутренней изоляции высоковольтного энергетического оборудования. Поэтому исследования физического механизма важны для понимания процесса старения диэлектриков при воздействии ЧР, для разработки аппаратуры и методик регистрации ЧР.

Характеристики частичных разрядов и физические процессы, связанные с ними, существенным образом зависят от поверхностных разрядов вдоль диэлектрического барьера. Поверхностный разряд возникает в результате оседания на диэлектрике зарядов, перенесенных каналом ЧР. При определенной величине тангенциальной составляющей напряженности, вызванной переносом зарядов, возникает разряд на поверхности диэлектрика. Возникающая при этом нормальная составляющая направлена против поля внешнего источника и является причиной прекращения частичных разрядов, а в некоторых случаях может вызвать обратный разряд, например, при смене полярности напряжения внешнего источника.

Был проведен расчет напряженности поля пятна заряда в предположении симметричного гауссовского распределения плотности осевшего заряда ЧР по поверхности диэлектрика

$$\sigma = \sigma_M \exp - (x^2 / a^2), \qquad (3.39)$$

где x - расстояние от центра пятна; a - постоянная, определяющая размер пятна осевшего заряда.

Для определения величины напряженности поля осевших зарядов $E_{зн}$ получено выражение:

$$E_{зн} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\varepsilon\varepsilon_0}\sigma_M \left[\frac{1}{\sqrt{x}} - 2ya^{-1}\left(0{,}5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{2}ya^{-1}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right) \exp\left(y^2 a^2\right) \right], \qquad (3.40)$$

где y - расстояние от диэлектрического барьера в направлении вектора поля внешнего источника напряжения.

В центре пятна осевшего заряда

$$E_{\text{зн}}(x=0; y=0) = E_{\text{зн}M} = \sigma_M (\varepsilon\varepsilon_0)^{-1}. \qquad (3.41)$$

Для расчета распределения потенциала, создаваемого осевшим зарядом в направлении, встречном полю внешнего источника напряжения, было получено выражение

$$\varphi_{\text{зн}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\varepsilon\varepsilon_0} a\sigma_M \left[\frac{1}{\sqrt{x}} - 2ya^{-1}\left(0{,}5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int\limits_0^{\sqrt{2}ya^{-1}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt\right)\exp\left(y^2a^2\right)\right]. \qquad (3.42)$$

В центре пятна осевшего заряда на поверхности диэлектрика

$$\varphi_{\text{зн}}(x=0; y=0) = \varphi_{\text{знМ}} = \frac{\sqrt{\pi}}{4\varepsilon\varepsilon_0} a\sigma_M . \qquad (3.43)$$

Плотность осевшего заряда определялась из отношения величины кажущегося заряда q единичных ЧР к площади их свечения S^*, полученной из эопограмм. Было установлено, что при атмосферном давлении воздуха в промежутке ПЧР возникают при условии

$$\sigma_M \geq 10^{-4}\ \text{Кл·м}^{-2}. \qquad (3.44)$$

Характерная величина a составляет примерно 1 мм при ЧР в промежутках с $d = 1...1{,}3$ мм. Подставляя найденные значения a и σ_M в (3.41) и (3.43), получим

$$\varphi_{\text{зн М}} = 5\text{кВ}; \quad E_{\text{знМ}} \approx 5\cdot 10^3\ \text{кВ·м}^{-1}.$$

Из анализа геометрии свечения и результатов измерения скорости поверхностного разряда был сделан вывод о том, что при положительной полярности осевшего заряда размеры формируются по стримерному механизму, а при отрицательной- по лавинному.

Если условие появления разрядов в виде (3.44) не выполняется, то ЧР формируются в виде серий микроразрядов. В исследованных образцах единичному ЧР соответствовали серии из 1…3 микроразрядов при $d > d_{гр}$ и 3…8 микроразрядов при $d \approx d_{гр}$. Между интенсивностью свечения микроразрядов и их числом наблюдалась обратная зависимость. Преимущественное место возникновения ЧР в полости - область боковых стенок. Если напряжение на образце превышало напряжение возникновения в два или более раз, то кроме свечения по периметру полости наблюдались также концентрические зоны свечения, чередующиеся с зонами, в которых свечение отсутствовало.

Данное обстоятельство можно объяснить формированием на диэлектрике определенного профиля периодически изменяющейся плотности осевшего заряда, который в одних зонах затрудняет развитие ЧР, а в других – способствует их возникновению.

Скоростное осциллографирование импульсов тока ЧР показало, что лишь около одного процента импульсов тока ЧР имеют два максимума. Интервал времени между максимумами составлял Δt= 5…40 нс. В остальных случаях импульсы тока имели один максимум. Форма импульсов тока при наличии и отсутствии поверхностных разрядов существенно отличалась. Для ЧР в виде серий микроразрядов характерны величины фронтов $t_{фэ}$=1,5…4 нс, и полные длительности импульсов тока не превышали $t_э$=10 нс. При появлении поверхностных разрядов длительность фронтов становились равной 5 нс, а общая длительность составляла 30-60 нс.

Из сопоставления эопограмм свечения с осциллограммами импульсов тока было установлено, что плотность тока в ЧР равна j=10…500 А·м$^{-2}$. Скорость развития каналов составляла V_k=3·10^4…4·10^5 м·с$^{-1}$. Такие скорости характерны для дрейфа электронов в воздухе [11…13] при соответствующих напряженностях электрического поля

$$V_k = c \cdot E^m, \tag{3.45}$$

где подвижность $c \approx 4{,}34$ м^2/В·с; $0{,}8 < m < 1{,}0$.

Концентрация электронов n_e была найдена подстановкой результатов измерений j и V_k в выражение

$$j = e_0 n_e V_k, \tag{3.46}$$

где e_0 - заряд электрона.

С учетом погрешности измерения концентрация электронов в каналах ЧР при атмосферном давлении воздуха составляла $n_e = 10^{16} \ldots 10^{18}$ м$^{-3}$. При таких величинах n_e электрон-молекулярные взаимодействия преобладают над электрон-электронными. Вследствие этого распределение электронов по энергиям не может быть равновесным. В области энергий электронов, при которых преобладают упругие соударения и соударения с возбуждением вращательных и колебательных уровней энергии молекул при оценке средней энергии $\overline{W}$ необходимо учитывать потери энергии при неупругих столкновениях

$$f(W_e)dW_e \approx (\overline{W}_e)^{-1{,}5}(W)^{0{,}5} \exp(-0{,}55 W_e^{\,2} \cdot \overline{W}_e^{\,-2}) dW_e, \tag{3.47а}$$

$$\overline{W}_e \approx 0{,}43\, E e_0\, \lambda_e \left(\frac{m_g}{m_e} \right)^{0{,}5} \delta^{-1}, \tag{3.47б}$$

где $f(W_e)dW_e$ - плотность вероятности распределения по энергиям;

λ_e - средняя длина свободного пробега электронов;

m_e и m_g - массы электронов и молекулы;

δ - коэффициент неупругих потерь энергии.

Подстановкой в (3.47б) величин $E = E_{\text{нв}}$, $\overline{\lambda} = 3 \cdot 10^{-7}$м и $\delta = 40 \ldots 70$ была определена средняя энергия электронов $\overline{W}_e = 2{,}8 \ldots 3{,}3$ эВ.

Основная масса электронов согласно виду и средней энергии распределения имеет энергию, меньшую энергии ионизации электронным ударом молекул и атомов газов, входящих в состав воздуха. Поэтому было высказано предположение о том, что в процессе ЧР определяющую роль в лавинном размножении электронов играют различные механизмы ступенчатой ионизации и, прежде всего, ассоциативная фотоионизация. В основе ее лежат химические реакции с участием возбужденных молекул:

$$
\begin{aligned}
&O_2^* + N_2 \Leftrightarrow NO + NO^+ + e_0, \\
&O_2^* + N_2 \Leftrightarrow O_3 + O^+ + e_0, \\
&N + O + 2{,}8\text{эВ} \Leftrightarrow NO^+ + e_0.
\end{aligned}
\qquad (3.48)
$$

Возбуждение молекул происходит при поглощении дальнопролетных фотонов нерезонансного излучения. Механизм ассоциативной фотоионизации объясняет форму каналов ЧР и короткие временные интервалы между появлением микроразрядов в различных местах разрядного промежутка.

Геометрическая форма разрядов ЧР была преимущественно цилиндрической и в виде усеченного конуса. На полученных эопограммах хорошо различаются области катодного свечения темного пространства вблизи металлического электрода при отрицательной полярности напряжения на нем и области слабого свечения "анодного столба". В образцах типа Б катодное свечение не выделяется по интенсивности. Возможное объяснение отсутствия четко выраженной зоны катодного свечения состоит в том, что электроны покидают поверхность диэлектрического катода со скоростью, достаточной для возбуждения молекул газа в непосредственной близости от катода.

При снижении давления воздуха до p=0,5…3·10^4 Па и ниже свечение ЧР в виде локализованных каналов переходит в сплошное диффузное

свечение во всем объеме промежутка; резко увеличивается зона свечения поверхностного разряда. С помощью одновременной регистрации импульсов тока ЧР и фототока установлено совпадение формы этих импульсов. При снижении давления длительность импульсов монотонно увеличивалась примерно до

10^{-6}с, а длительность фронта до $1{,}2\ldots3\cdot10^{-7}$. Временной сдвиг между максимумами тока и свечения отсутствует при снижении давления до 10^{3} Па, а при более низких давлениях максимум свечения опережает максимум тока на 30…60 нс. Свечение ЧР обусловлено, в основном, процессами возбуждения молекул электронами. Поэтому по результатам регистрации ЧР можно судить об интенсивности электронной составляющей тока ЧР и ее изменениях во времени. Из этих соображений и из экспериментально установленного совпадения форм импульсов тока ЧР и фототока при пониженных давлениях был сделан вывод о том, что электронная составляющая тока ЧР определяет амплитудные значения регистрируемых сигналов. Увеличение длительности фронтов и сдвиг между максимумами оптического излучения и тока при пониженных давлениях можно объяснить инерцией сброса возбуждения при столкновении молекул.

Вследствие запаздывания ЧР результаты измерения зависят от скорости подъема напряжения. Время запаздывания ЧР, особенно в полостях малых размеров, может достигать десятка и более секунд. Основная причина запаздывания – малое число начальных электронов, инициирующих лавинные процессы. Был проведен анализ различных механизмов генерации начальных электронов, аналогичный проведенному авторами, но с учетом специфики замкнутой диэлектриком полости и ее малого объема. В итоге анализа был сделан вывод о том, что основными механизмами генерации начальных электронов являются два процесса: распад отрицательных ионов, адсорбированных на стенках полости во время предыстории ЧР и ионно-

электронная эмиссия (выбивание электронов положительными ионами, опять-таки накопленных во время предыстории ЧР).

Поскольку важную роль в зажигании ЧР играет процесс накопления на стенках полости ионов, то для снижения времени запаздывания и повышения метрологической надежности измерения напряжения возникновения ЧР была предложена методика его определения при повторном подъеме напряжения. При повторном подъеме величина $U_{н}$ практически не зависит от скорости первого и второго подъемов напряжения. Отметим, что подобная методика была рекомендована, но без какой-либо аргументации рабочей группой СИГРЭ для испытаний силовых трансформаторов.

Чувствительность регистрации $U_{н}$ также определяет достоверность результатов измерения. Благодаря применению ЭОП оказалось возможным фиксировать появление ЧР в тех случаях, когда чувствительность электрического метода регистрации была недостаточной. Было установлено, что свечение ЧР в полостях с $d<100$ мкм появляется при напряжении $U_{нв}$ в полости заметно меньше пробивного напряжения воздуха, определяемого по кривой Пашена [10]. При этом в тонких полостях при зажигании ЧР их свечение охватывало всю полость, имело диффузный характер и очень малый кажущийся заряд, 0,01пКл. В дальнейшем свечение локализовывалось в отдельные пятна с диаметром 50-200 мкм, места расположения которых могли оставаться неизменными в течение десятков секунд. Время локализации диффузного свечения пятна увеличивалось по мере уменьшения глубины полости до нескольких секунд, что можно объяснить эволюцией потенциального рельефа осевших зарядов и, в какой-мере, изменениями среды (плотность и состав воздуха).

Величина $U_{нв}$ определялась пересчетом общего напряжения $U_н$ на образце в момент возникновения ЧР к воздушному промежутку между стенками полости

$$U_{нв} = U_н \left(1 + b/\varepsilon d\right)^{-1} \qquad (3.49)$$

По полученным экспериментальным данным можно предложить для использования вместо кривой Пашена при нормальной плотности воздуха эмпирическую зависимость вида:

$$U_{нв} \approx 4{,}7 d^{0{,}7}, \text{кВ}, \qquad (3.50)$$

где $d = 0{,}015$ -1,0 мм.

В результате измерений кажущегося q и максимального кажущегося Q зарядов было установлено следующее.

1. Динамический диапазон изменения заряда ЧР в отдельной полости составлял $Qq^{-1} = 7...16$; в образцах "сфера-плоскость" Qq^{-1}>10. При появлении поверхностного разряда кажущийся заряд имел максимальную величину. Величина Q всегда была меньше расчетных величин Q_p. На рис. 3.12 представлены зависимости расчетной величины кажущегося заряда Q_p, экспериментально измеренных величин максимального кажущегося заряда в образцах типа В, $Q_в$, максимального $Q_б$ и минимального $q_б$ кажущихся зарядов в образцах типа Б. Величина Q_p определялась в соответствии с классической емкостной схемой замещения диэлектрика с воздушным включением и в предположении, что ЧР охватывает всю поверхность стенок полости, и напряжение в момент пробоя падает до нуля, т.е. в предположении полной разрядки емкости включения и примыкающей к ней емкости диэлектрического барьера

$$Q_p = CU_{\text{нв}}. \tag{3.51}$$

Наблюдаемые отклонения регистрируемой величины максимального кажущегося заряда Q от расчетной оценки можно объяснить, во-первых, неполной разрядкой емкости включения и, во-вторых, методическими особенностями регистрации электрических сигналов ЧР

$$Q \cdot Q_p^{-1} = kC^* C^{-1}\left(1 - U_{\text{пв}} U_{\text{нв}}^{-1}\right), \tag{3.52}$$

где C^*-емкость диэлектрического барьера, разряжаемая единичным ЧР; $U_{\text{нв}}$- напряжение погасания ЧР; k-коэффициент, величина которого зависит от методики регистрации заряда.

С целью определения величины коэффициента k были проведены эксперименты на образцах типа В с металлизированными стенками полости. В этом случае можно было быть уверенным, что вся поверхность стенок полости разряжается единичным ЧР, а напряжение погасания близко к нулю. Было установлено (см. две верхних кривых на рис. 3.12), что $k \approx 0{,}5$. Причина, по которой регистрировалась примерно половина заряда ЧР, состояла в следующем. Сигналы ЧР, выделяемые на измерительном сопротивлении, были обусловлены протеканием через диэлектрические барьеры тока смещения, возникающего вследствие дрейфа электронов и ионов в канале ЧР. Так как подвижность электронов на два порядка выше подвижности ионов, то и составляющая тока смещения, связанная с дрейфом электронов, была во столько же раз больше, чем от ионной составляющей, а регистрируемый заряд был равен половине суммарного заряда ЧР. В отдельных экспериментах, в которых действие ЧР имитировалось закорачиванием металлизированных стенок полости подсоединенными к ним контактами ртутного реле, получали $k \approx 1$.

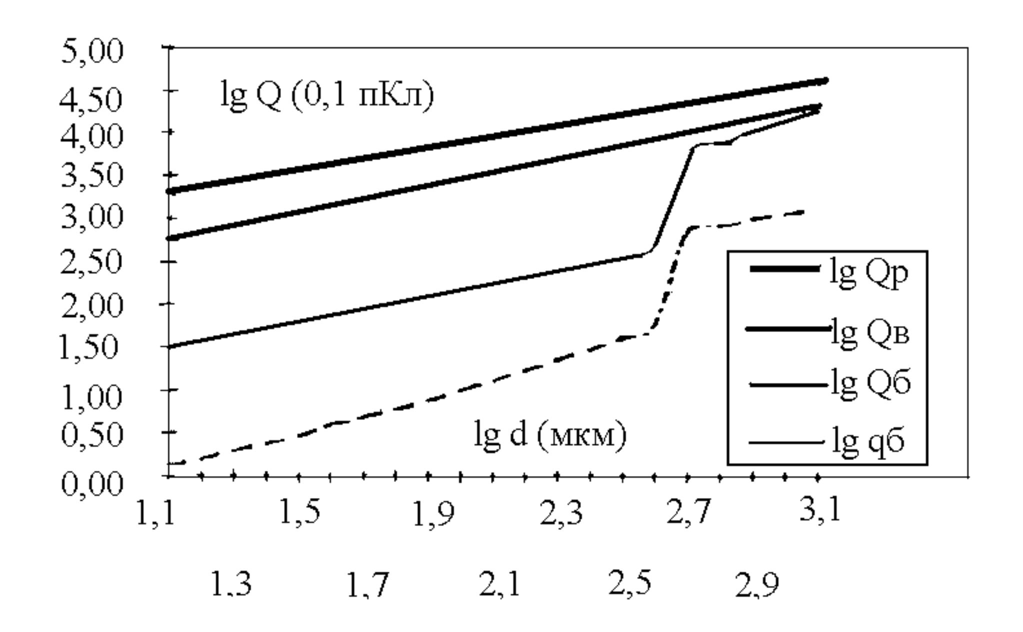


Рис. 3.11. Зависимость величины заряда от глубины полости.

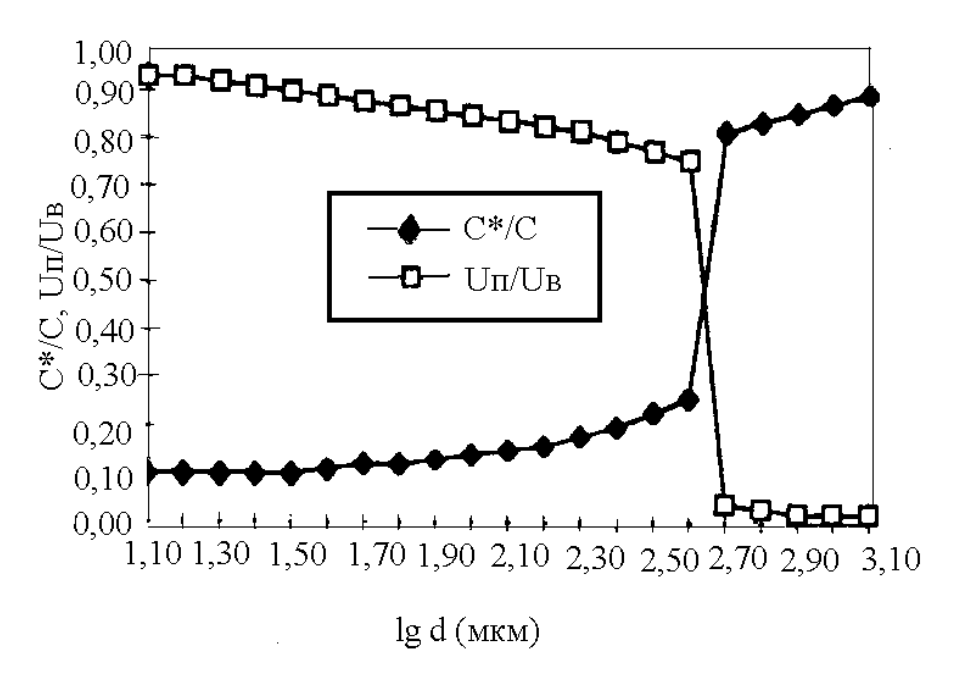


Рис. 3.12. Зависимость напряжения погасания и емкости разряжаемой единичным ЧР от глубины полости.

2. Из соотношения Q и $Q_{\text{расч}}$, а также из соотношения площади свечения единичных ЧР к площади полости и с учетом $k \approx 0{,}5$ для ЧР в образцах типа Б были сделаны оценки величин отношений C^*C^{-1} и $U_{\text{пв}}U_{\text{нв}}{}^{-1}$, представленные на рис.3.12 в виде зависимостей от глубины полости.

На рис.3.11 и 3.12 видны резкие изменения в ходе кривых при $d \approx d_{\text{гр}}$, обусловленные сменой механизма ЧР при появлении разрядов по поверхности диэлектрика

- $C^* \cdot C^{-1} = 0{,}1 - 0{,}3; U_{\text{пв}} \cdot U_{\text{нв}}{}^{-1} = 0{,}7 - 0{,}96; QQ^{-1}{}_p = 0{,}014 - 0{,}1; Qq^{-1} = 6 - 9$

  при $d < d_{\text{гр}}$;
- $C^* \cdot C^{-1} = 0{,}25 - 1{,}0; U_{\text{пв}} \cdot U_{\text{нв}}{}^{-1} = 0{,}4 - 0{,}5; QQ^{-1}{}_p = 0{,}15 - 0{,}5; Qq^{-1} = 12 - 16$

  при $d > d_{\text{гр}}$.

Увеличение динамического диапазона при $d > d_{\text{гр}}$ объяснялось существованием двух видов ЧР: первый в полупериоде напряжения сопровождался разрядами по поверхности диэлектрика, а последующие формировались сериями микроразрядов и имели значительно меньшую величину заряда. Динамический диапазон изменения величины заряда при отсутствии поверхностного разряда был обусловлен вариацией количества микроразрядов в единичном ЧР.

3. Представленные выше результаты измерения были получены из обработки осциллограмм сигналов ЧР, следующих с частотой не менее 100 имп/с (по одному в полупериод напряжения). Однако наблюдались и однократные, редко повторяющиеся ЧР с величиной $Q \approx 0{,}5Q_p$. Поэтому для достоверной регистрации максимального заряда необходимо производить измерения не только периодических, но и однократных сигналов ЧР. Это обстоятельство учитывалось в последующем при разработке регистраторов ЧР.

4. Измерение кажущегося заряда ЧР скоростными и нескоростными осциллографами дает одинаковые результаты при прочих неизменных параметрах схемы регистрации. Чувствительность регистрации одинакова при одинаковой величине произведения коэффициента усиления на полосу частот усилителя регистратора. Однако скоростная регистрация предпочтительнее, так как помимо информации о величине заряда с помощью скоростных осциллограмм можно по их особенностям оценить время и место формирования, вид ЧР, размер воздушной полости и др.

5. Измерение заряда можно проводить по стандартной методике с предварительной градуировкой и методом интегрирования площади осциллограмм импульсов тока ЧР. Оба метода дают близкие результаты, при соответствии формы градуировочного импульса и импульсов тока ЧР.

6. Зависимость величины Q от давления воздуха при $U = U_{\text{н}}$ имеет максимум при $p = 0{,}5 \ldots 3 \cdot 10^4$ Па.

Полученные в работе результаты исследований пространственно-временных и энергетических характеристик ЧР были использованы для

формирования ряда требований к схеме регистрации и аппаратуре для измерения ЧР.

Схема регистрации должна иметь согласованный высокочастотный сигнальный тракт, обеспечивающий пропускание частот в предельно широкой полосе, вплоть до 10^9 Гц. Представляется целесообразной регистрация формы импульсов тока единичных ЧР с использованием скоростных цифровых осциллографов. Скоростная регистрация импульсов тока ЧР, как это уже было показано, дает информацию о наличии или отсутствии поверхностного разряда, о времени формирования ЧР и о составляющих тока ЧР. Кроме того, по виду осциллограмм импульсов тока можно различать ЧР, возникшие в различных типах образцов. В работе был установлен ряд особенностей осциллограмм ЧР в образцах с полостью типов Б, В, Г и в комбинированных образцах с двумя соосными полостями. Эти особенности могут быть положены в основу определения вида и числа дефектов по форме электрических сигналов.

Регистраторы ЧР должны обладать широкой полосой частот ($f_1 = 10^4$ Гц, $f_2 \geq 10^7$ Гц), предельно высокой чувствительностью по заряду. Динамический диапазон регистратора по входным сигналам должен быть не менее 100. Измерение максимального кажущегося заряда должно производиться и при периодически повторяющихся сигналах, и при однократных. Основное требование при разработке имитаторов ЧР состоит в соблюдении соответствия временных характеристик импульсов ЧР и градуировочных импульсов.

3.5. Признаки старения изоляции.

Последние годы наблюдается интенсивное расширение области использования полимерной изоляции в высоковольтных электроустановках: кабелях, изоляционных конструкциях, коммутационных аппаратов, в подвесной и опорной изоляционных конструкциях, в ограничителях перенапряжений и других. Вместе с известными преимуществами, малоизученными пока являются проблемы старения изоляции, условия возникновения дефектов. Поэтому в настоящем параграфе проводится анализ признаков старения полимерных изоляционных конструкций.

Для выбора признака и построения физической модели ресурса необходимо знать физические механизмы процессов, приводящих к старению изоляции. В первую очередь на склонность материала к старению влияют технологические факторы, приводящие к изменениям в структуре материала.

Так например, технологические процессы переработки полиэтилена при наложении изоляции и оболочек кабеля методом экструзии обусловливают незавершенность процессов кристаллизации и появление остаточных внутренних напряжений. Для композиций низкой плотности, используемых для изоляции и оболочек кабелей, характерна структура с развитой поверхностью раздела аморфной и кристаллической фаз. Степень кристалличности не превышает 40%. Внутренние напряжения в дальнейшем приводят к усадке изоляции и оболочки по длине кабеля. Оба этих процесса предопределяют в условиях повышенных температур при эксплуатации кабелей изменения в надмолекулярной структуре вследствие дополнительной кристаллизации и релаксации внутренних напряжений. Эти изменения усиливаются при одновременном воздействии на кабель температуры и механических нагрузок. В свою очередь изменения в надмолекулярной структуре неизбежно влияют и на характеристики изоляции кабеля.

Наблюдаемые при термомеханическом старении изоляции кабелей структурные изменения фиксируются методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. Как показали исследования, при этом не происходит изменений основных параметров широкоуглового рассеяния, а также степени кристалличности и размеров кристаллитов. В то же время интенсивность малоуглового рефлекса необратимо возрастает, рис. 3.13, что позволяет сделать вывод об изменениях в надмолекулярной структуре после длительной выдержки при повышенной температуре. Аналогичный вывод сделан и на основе изучения термограмм плавления полиэтилена до и после длительного отжига. На термограммах плавления, наблюдается дополнительный пик плавления при более низких температурах по сравнению с основным пиком, рис. 3.14, 3.15, о том, что в результате длительного теплового старения ПЭ в механически напряженном состоянии происходит упорядочение промежуточных областей на границе раздела кристаллической и аморфной фаз. Зависимости, приведенные на рис 3.15, позволили выбрать в качестве параметра – критерия работоспособности величину $\Delta T = T_0 - T_1$ –разность температур между основным и дополнительным пиками плавления, где T_0 – температура основного максимума на термограмме плавления, независящего от времени старения; T_1 – температура второго максимума плавления, появляющегося после старения.

Калориметрические исследования показывают рост энтальпии плавления при увеличении времени теплового воздействия. На рис. 3.16 приведены зависимости, свидетельствующие о корреляции возрастания энтальпии плавления с уменьшением электрической прочности, причем эти процессы наблюдаются не только при тепловом старении, но и при фотостарении. Также установлено, что при достижении на кривой энтальпии насыщения происходит появление микротрещин на поверхности образцов и резко снижается их механическая прочность. Основной причиной, приводящей к изменению энтальпии плавления независимо от вида воздействия термического или ультрафиолетового облучения считают физические перестройки структуры, приводящие к изменению свободной энергии системы, что в свою очередь, приводит к накоплению внутренних дефектов, повышению внутренних напряжений уменьшению механической и

электрической прочности. В качестве параметра старения, берут величину, соответствующую сдвигу кривой энтальпии плавления относительно кривой, характеризующей временную зависимость энтальпии при фотостарении исходного образца.

На основе анализа уже имеющихся данных, а также данных по результатам исследований автора, можно считать установленным факт, что уменьшение ресурса кабелей с ПЭ изоляцией обусловлено структурными изменениями в процессе теплового старения. Поэтому правомочно ставить задачу выбора такого параметра – критерия работоспособности, который чувствителен к изменению структуры образца на любом уровне ее организации. При выборе параметра – критерия работоспособности необходимо учесть возможность измерения параметров, как на опытных образцах, так и на всей длине кабеля. Это условие исключает возможность использования непосредственно структурных и теплофизических параметров, так как для их измерения необходимо брать пробы с нарушением целостности кабеля. Что касается прочностных характеристик, а именно, электрической и механической прочности, то измерение их связано с разрушением образцов и кабелей и также не подходит для неразрушающего метода определения ресурса. Поэтому при разработке неразрушающих методов определения ресурса выбор структурно-чувствительного параметра ограничивается использованием в этом качестве параметров, значения которых не связано с размерами образцов и их разрушением.

Известно, что тепловое движение структурных элементов в полимерах и их подвижность обусловливают релаксационные переходы, которые изучаются методами релаксационной спектроскопии. В первую очередь структурная неоднородность проявляется при изучении температурно-частотных спектров механических и диэлектрических потерь. В табл. 3.10 приведены сведения по классификации релаксационных переходов и их предполагаемой природе для ПЭ низкой плотности по данным измерений механических потерь.

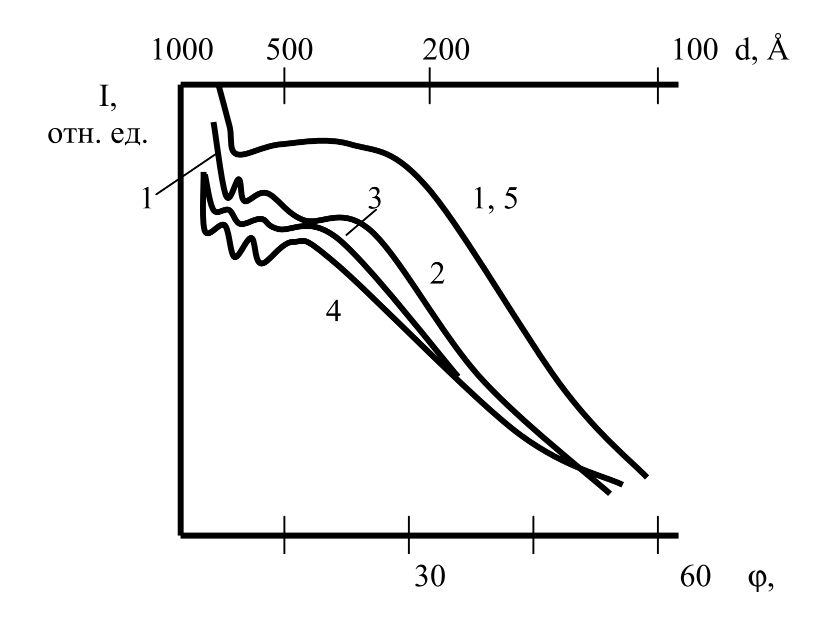


Рис. 3.13. Диаграммы малоуглового рассеяния исходного образца полиэтилена (1) и отожженных в течение 1000 (2), 5000 (3) и 10000 (4) ч. 5 – образец нагрет выше $T_{пл}$ и охлажден.

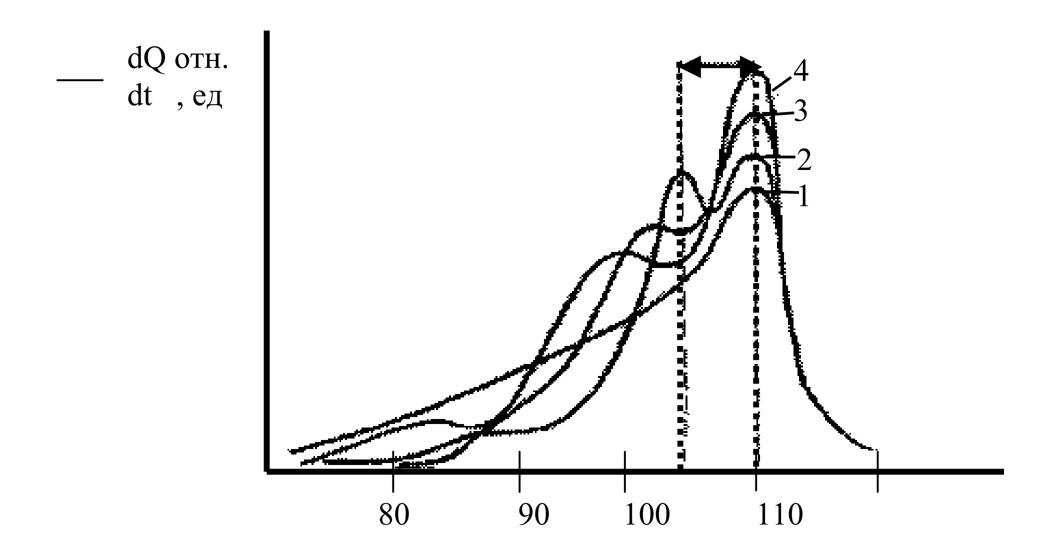


Рис. 3.14. Температурные зависимости теплоемкости образцов полиэтилена. 1 – исходный образец, 2-4 – образцы, отожженные в течение 1000 (2), 5000 (3) и 10000 (4) ч.

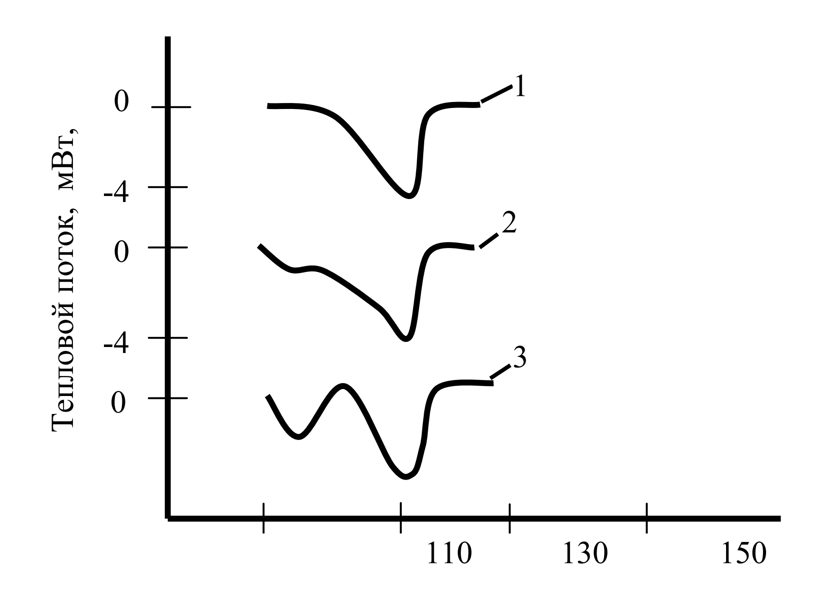


Рис. 3.15. Кривые плавления полиэтилена 1 – исходный образец, 2 – после старения при 70ºС, 3 – после старения при 100ºС.

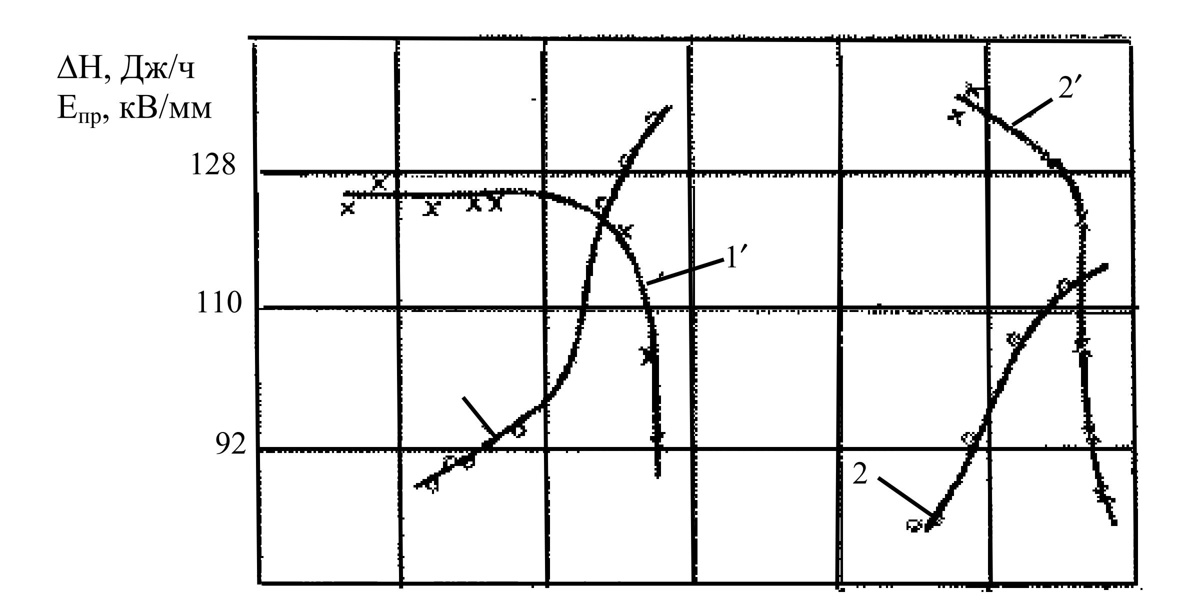


Рис. 3.16. Зависимости энтальпии плавления (1, 2) и электрической прочности (1′, 2′) полиэтиленовых образцов.

Таблица 3.10.

елаксационные переходы в полиэтилене.

Переход	Природа области молекулярной подвижности	Температура перехода Тм, К
γ'	Движение концевых групп в аморфных областях	121
γ	Движение в дефектах кристаллов	153 192
β_1 β_2	Движение групп в аморфных областях	213 240
α'_1 α_2	Кооперативная подвижность	257 262
α′	Движение на границах кристаллических областей	347
α″	Заторможенное движение в складках кристаллитов	366

Спектры механических потерь отражают те же процессы молекулярного движения, что и диэлектрические, но отличаются большей мультиплетностью вследствие большей чувствительности применяемых методов.

Для диэлектрических спектров различимы три основных перехода. Низкотемпературный максимум γ диэлектрических потерь определяется подвижностью отдельных групп макромолекулы; β – максимум связан с

сегментальной подвижностью, он находится выше температуры стеклования полимера; α – максимум связан с движением полярных групп по поверхности кристаллитов.

В ряде работ установлено, по мере увеличения времени теплового старения в области γ – релаксации и β – релаксации интенсивность релаксационных процессов уменьшается, что ведет к снижению $tg\delta_м$ в максимумах температурной и частотной зависимостей, но положение максимумов сохраняется при той же температуре или частоте. В то же время по мере увеличения времени старения в области α – релаксации происходит увеличение тангенса угла диэлектрических потерь $(tg\delta_м)$ в максимуме температурной и частотной зависимостей и, что самое существенное, происходит смещение максимума частотной зависимостей $tg\delta_м$ на температурных зависимостях в область более высоких температур, а на частотных – в область низких частот, рис. 3.17, 3.18. Установлено, что эти закономерности сохраняются при измерении $tg\delta$ на прессованных пластинах, срезах с изоляции и оболочек кабеля и на отрезках кабелей, табл. 3.11.

Таблица 3.11.

Значения $tg\delta$ α, β и γ – релаксационных максимумов для образцов полиэтилена.

Образцы	Состояние образцов	Час-тота, кГц	$T_м^\alpha$, К	$tg\delta_м x 10^4$	$\Delta T_м$, К	$T_м^\beta$ К	$tg\delta_м x 10^4$	$T_м^\gamma$ К	$tg\delta_м x 10^4$
Пластины 153-01К	Исходное	1	300	3.6	0	248	1.5	163	1.3
	10000 час старения	1	333	4.9	33	248	1.5	163	0.6
Пластины 153-01К	Исходное	10	300	4.0	0	273	2.0	193	1.3
	10000 час старения	10	333	4.9	50	273	1.7	193	1.0
Срезы 107-01К	Исходное	1	317	2.0	0	230	2.3	180	1.7
	500 час старения	1	325	4.5	8	230	2.3	180	1.7
	2000 час старения	1	333	8.4	16	230	2.1	180	1.5
Срезы 107-01К	Исходное	650	321	2.2	0	250	6.0	195	2.8
	500 час старения	650	343	4.5	22	250	5.6	195	2.8
	2000 час старения	650	350	12	29	250	1.8	195	2.3

На рис. 3.19 показана серия кривых $tg\delta$ в области α – релаксации для образцов с различной термической предисторией, в том числе для исходного и состаренного в течение 4000 часов.

Путем растворения исходного и состаренного ПЭ в дихлорбензоле и последующей тонкой фильтрацией раствора не обнаружено значительного содержания в состаренном ПЭ сшитых химических структур, что доказывает, что при старении не происходит изменения степени кристалличности. Об этом же свидетельствует тот факт, что закалка состаренных образцов (кривая $2''$) не снижает интенсивности потерь в области максимума. Длительный отжиг ПЭ образцов с последующей закалкой в жидком азоте уменьшает время α – релаксации почти до исходной величины, что указывает на отсутствие жесткой химической сетки после старения. Увеличение $tg\delta$ в

области α – релаксации свидетельствует о росте концентрации карбонильных групп в процессе старения. Сдвиг положения максимума tgδ или увеличение наивероятнейшего времени релаксации a – процесса связано с образованием более упорядоченных, чем аморфная фаза, физических узлов, закрепляющих цепи макромолекул.

На рис. 3.20 приведены температурные зависимости исходных и состаренных образцов для саженаполненного ПЭ марки 153-10К. Из рисунка видно, что для саженаполненного ПЭ α – релаксационный процесс разделяется на 2 максимума. Это может быть связано с гетерогенным распределением сажи в ПЭ, которая агрегируется преимущественно на границах раздела аморфной и кристаллической фаз. Сдвиг по оси температур максимумов такой же, как у образцов изоляционного ПЭ той же продолжительности старения.

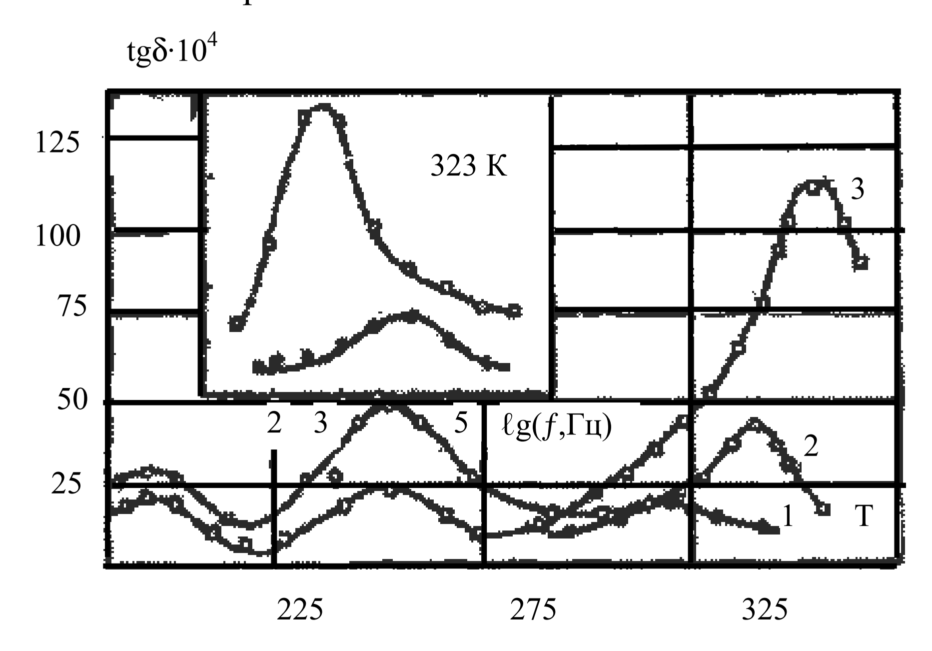


Рис. 3.17. Зависимость от температуры и частоты для срезов с изоляции: 1 – исходный, после старения при 358К, 2 – 500 ч, 3 – 2000 ч, 4 –3500 ч.

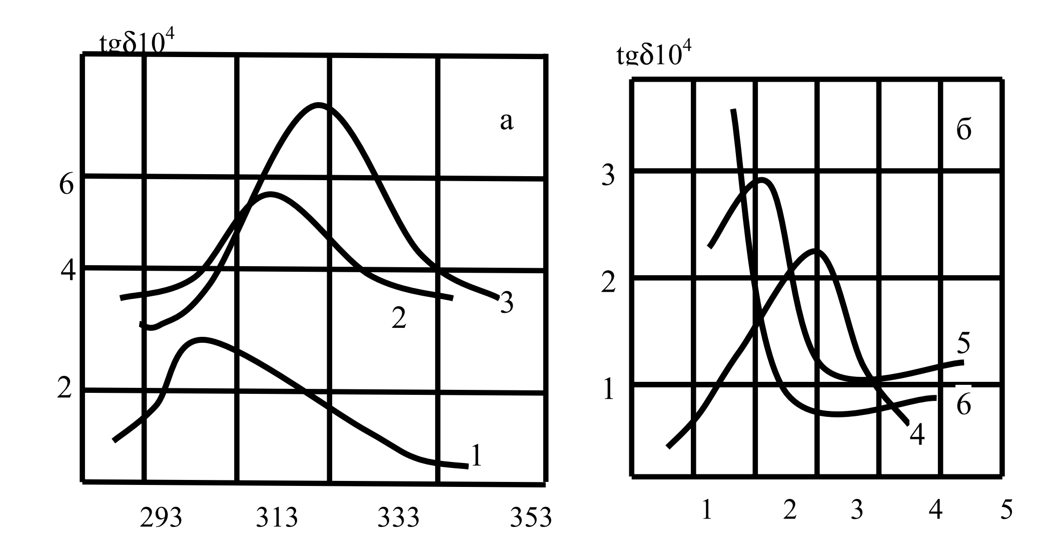


Рис. 3.18. Зависимости tgδ от температуры (а) и частоты (б) для отрезков кабеля: а) 1 – исходный; 2, 3 – после старения 650, 1000 часов; б) 4 – исходный; 5, 6 – после старения 2000, 8500 часов.

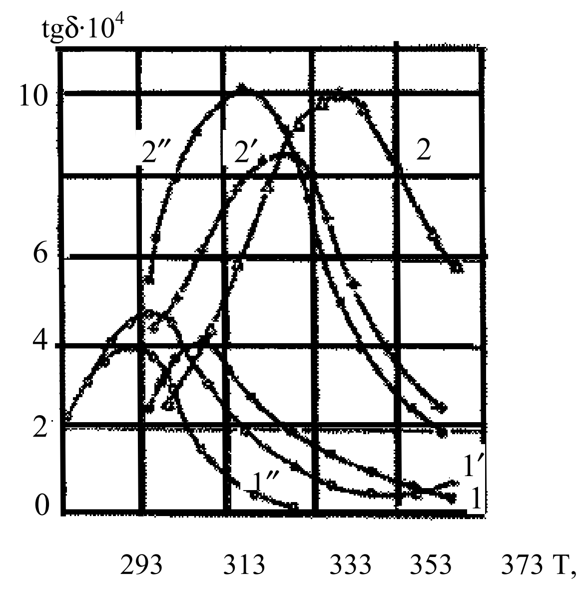


Рис. 3.19. Зависимости tgδ диэлектрических потерь от температуры при частоте измерения 1 кГц для исходного и состаренного ПЭ марки 107-01К с различной термической предысторией: 1 – исходный образец; 1′ – исходный, закаленный в холодной воде после отжига (1,5 ч. при Т=413К); 1″ – исходный, закаленный в жидком азоте после отжига (3 ч. при Т=413К); 2 – образец после 4000 ч. старения при 358К; 2′ – после 4000 ч. старения, закаленный в жидком азоте после отжига 3 ч. при Т=413К; 2″ – образец 2, отожженный в течение 3 ч. при 413К и закаленный в жидком азоте.

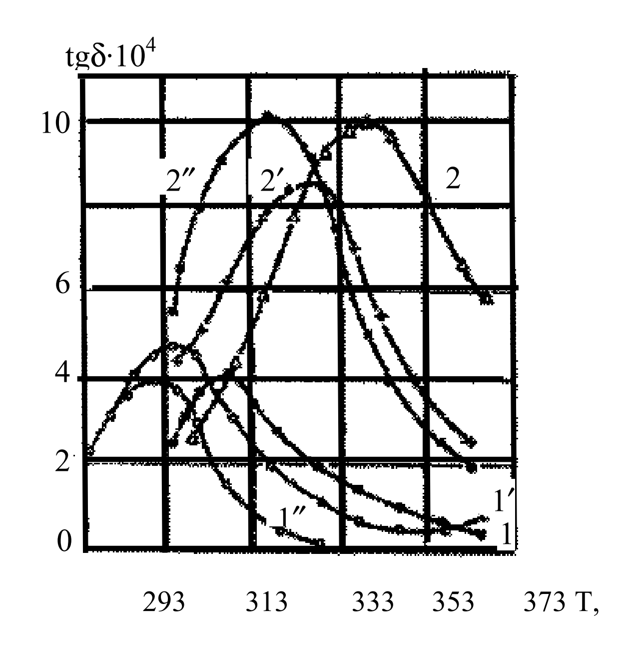


Рис. 3.19. Зависимости tgδ диэлектрических потерь от температуры при частоте измерения 1 кГц для исходного и состаренного ПЭ марки 107-01К с различной термической предысторией: 1 – исходный образец; 1′ – исходный, закаленный в холодной воде после отжига (1,5 ч. при T=413K); 1″ – исходный, закаленный в жидком азоте после отжига (3 ч. при T=413K); 2 – образец после 4000 ч. старения при 358K; 2′ – после 4000 ч. старения, закаленный в жидком азоте после отжига 3 ч. при T=413K; 2″ – образец 2, отожженный в течение 3 ч. при 413K и закаленный в жидком азоте.

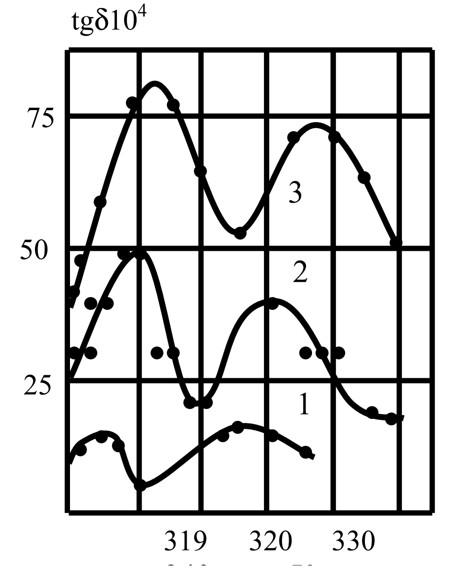


Рис. 3.20. Зависимость tgδ от температуры для исходного и состаренного саженаполненного ПЭ при 1 кГц: 1– 0 ч; 2 – 1000 ч; 3 – 3200.

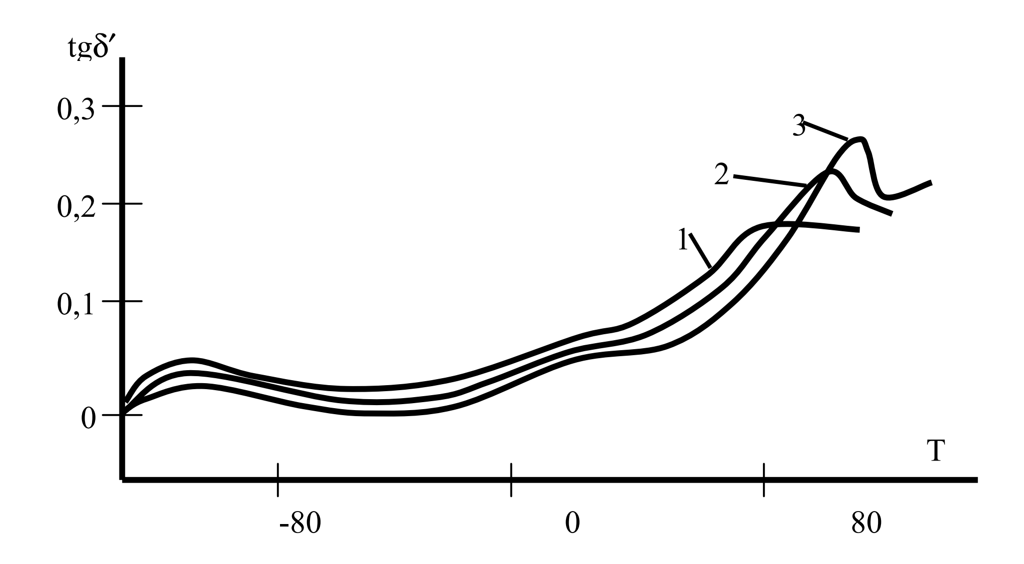


Рис. 3.21. Зависимости tgδ′ механических потерь при различных временах старения при 85ºС: 1 – 100 ч.; 2 – 1000 ч.; 3 – 10000 ч.

Аналогичная информация об уровне структурной организации получены при изучении динамических вязкоупругих характеристик исходного и состаренного полиэтилена. Наблюдается полная корреляция диэлектрических и механических потерь для исходных и состаренных образцов, рис. 3.21.

Полученные результаты подтверждают, что положение максимума $tg\delta_{м}$ на температурной или частотной зависимости соответствует определенной структуре полимера и величины $\Delta T_м$ или $\Delta f_{м}$, т.е. отклонения местоположения $tg\delta_{м}$ от исходного состояния вследствие старения могут служить количественной мерой оценки процесса старения. Эти параметры легли в основу математической модели ресурса.

Экспериментально установлено, что между выбранными параметрами – критериями работоспособности $\Delta T_м$ и $\Delta f_{м}$ и общепринятым критерием – температурой холодостойкости T_x – имеется прямая корреляционная связь, рис. 3.22.

Эти зависимости могут быть представлены линейными функциями

– от температуры – $T_х=189+1.7\ \Delta T_м$;

– от частоты приложенного напряжения – $T_x=154+0.13\ \Delta f_м$,

где T_x – температура холодостойкости в градусах Кельвина.

Введем коэффициент изменения параметра – критерия работоспособности от времени старения:

$$К_п = \frac{П_{пр} - П_н}{\ln \tau_{пр} - \ln \tau_н},$$

где $П_{пр}$, $П_н$ – соответственно значения параметра: предельное (выработанный ресурс) и наработанное в процессе эксперимента; $\tau_{пр}$ – предельное значение наработки, соответствующее $П_{пр}$; $\tau_{пр}$ – наработанный ресурс в момент измерения параметра $П_н$.

В соответствии с зависимостью можно найти наработанный ресурс:

$$\tau_н = \tau_{пр} \exp\left(П_н - П_{пр}\right) / К_п.$$

При определении ресурса при температурах, отличных от температуры старения в форсированном режиме, при котором определен коэффициент $К_п$, полученная зависимость преобразуется к виду:

$$\tau_н = \tau_{прф} \cdot \exp\left[\frac{П_н - П_{пр}}{К_п} + \frac{W}{R}\left(\frac{1}{T_р} - \frac{1}{T_ф}\right)\right],$$

где $\tau_{прф}$ – предельное значение ресурса в формированном режиме испытаний; $T_ф$ – температура старения в форсированном режиме; $T_р$ – рабочая температура кабеля; W – условная энергия активации процесса разрушения.

Для использования этой формулы для расчета наработанного в процессе эксплуатации кабеля ресурса необходимо провести ускоренные испытания на долговечность, чтобы определить параметры – критерии работоспособности – $\Delta T_м$ и $\Delta f_м$. На рис. 3.23,б приведены зависимости ресурса от величины измеряемых в процессе наработки параметров для кабеля с ПЭ изоляцией, на образцах которого одновременно проводились испытания на долговечность и определение в процессе ресурсных испытаний

зависимостей – $\Delta T_м$ и $\Delta f_м$ от времени наработки ресурса.

При выборе параметра–критерия работоспособности следует учитывать условия измерения. Измерение параметра – $\Delta T_м$ необходимо проводить при равномерном нагреве кабеля, что практически невозможно. Более удобным для измерения является параметр – $\Delta f_м$, т.к. при этом образец находится при фиксированной температуре эксплуатации кабеля либо отключен и требуется лишь снятие частотной зависимости. Однако в настоящее время нет подходящего измерительного оборудования для снятия полной частотной зависимости. Поэтому был разработан экспресс – метод, позволяющий определить параметр $\Delta f_м$, проводя измерения лишь на 2-х частотах. Суть этого метода заключается в следующем.

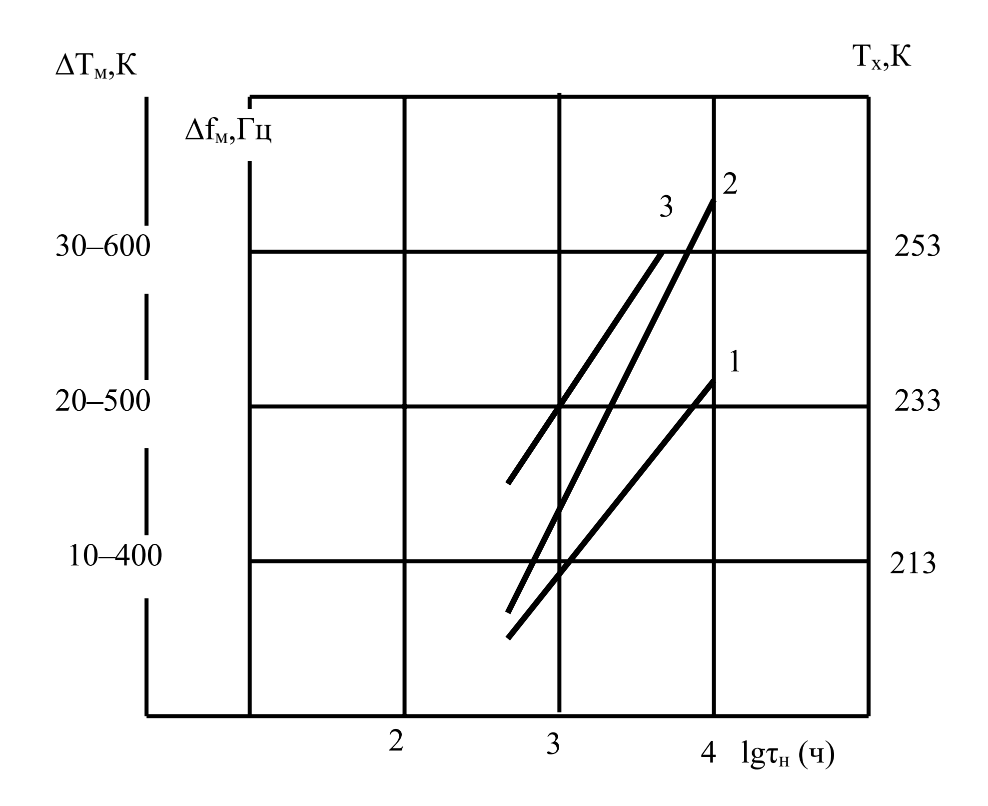
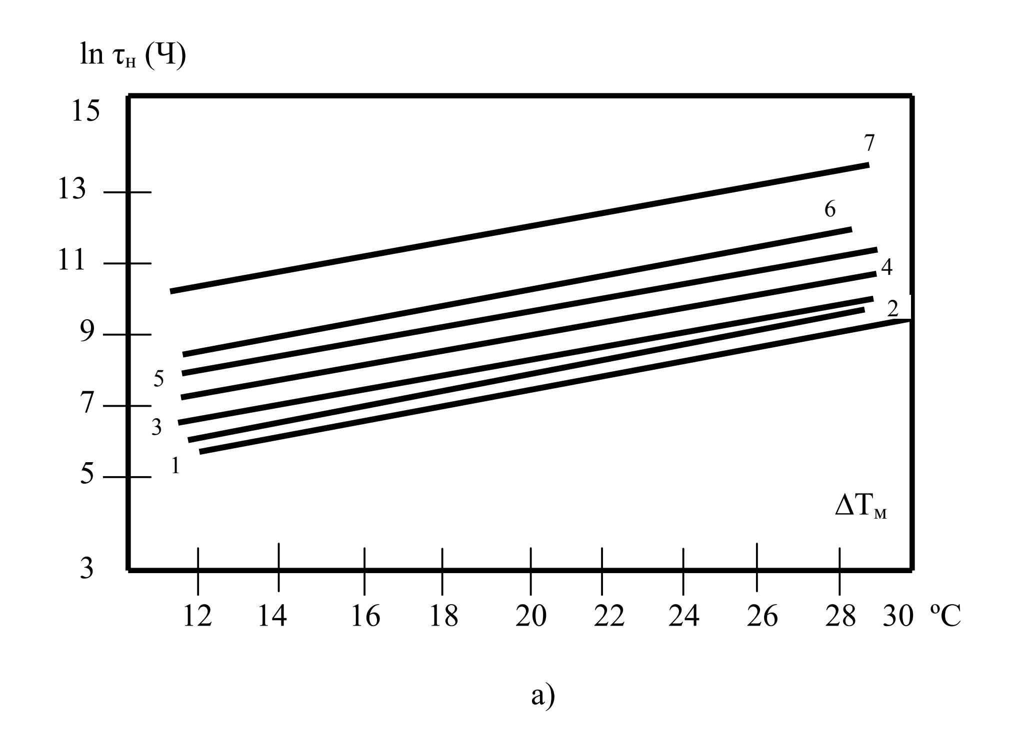
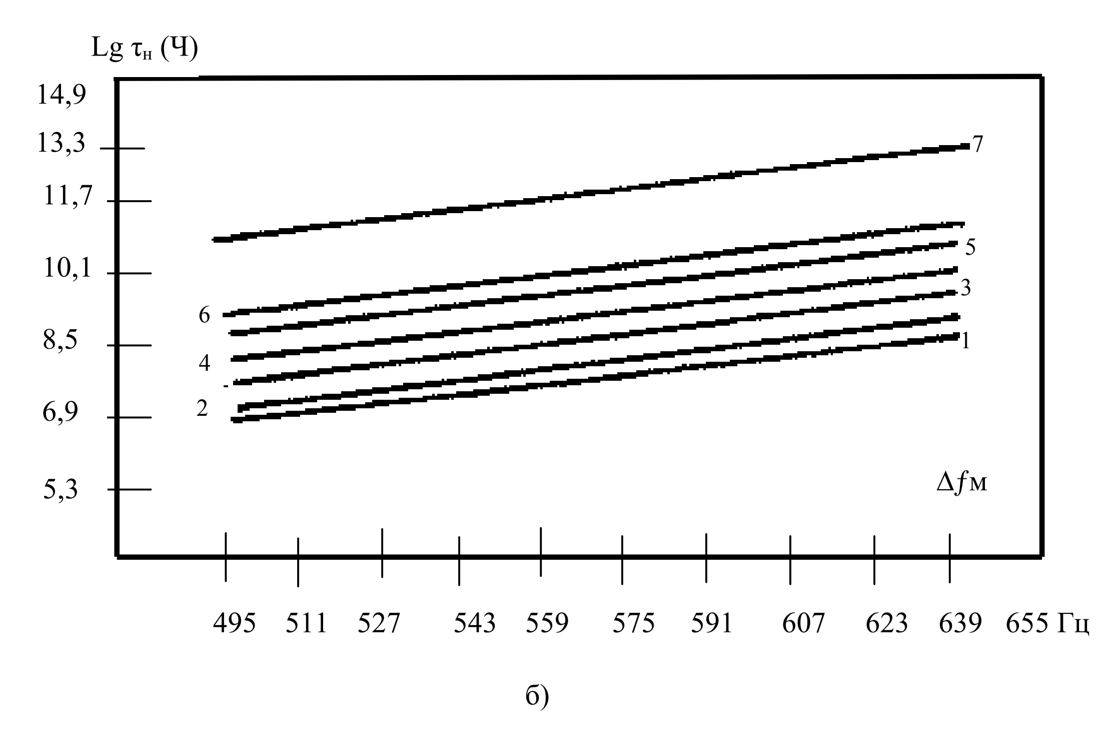


Рис. 3.22. Корреляционные зависимости параметров старения для отрезков кабеля. 1 – температура холодостойкости $T_х$; 2 – $\Delta T_м$; 3 – $\Delta f_м$.



а)



б)

Рис. 3.23. Зависимости наработанного ресурса от параметров – критериев работоспособности: а) – от $\Delta T_м$, б) – от $\Delta f_м$; 1 – Т=358 К; 2 – Т=353 К, 3 – Т=343 К; 4 – Т=333 К; 5 – Т=323 К; 6 – Т=317 К; 7 – Т=293 К.

Зависимость потерь энергии от частоты определения формулой:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_m \sec h\lambda x,$$

где ε''_m –фактор потерь энергии в области максимума, λ – параметр распределения времен релаксации, $x=\ln f/f_m$ – частотный параметр.

Проведя измерения на 2-х частотах, составим в соответствии с последней формулой систему из 2-х уравнений; далее, решая эту систему относительно ε''_m и принимая во внимание, что $\varepsilon''=\varepsilon'\,tg\delta$ и считая, что ε' для ПЭ практически при измерениях на 2-х частотах можно считать постоянной величиной, получена формула для определения f_m:

$$f_m = \sqrt{f_1 f_2 \left(\frac{f_1^{\lambda} tg\delta_1 - f_2^{\lambda} tg\delta_2}{f_1^{\lambda} tg\delta_2 - f_2^{\lambda} tg\delta_1} \right)^{\frac{1}{2\lambda}}}.$$

Рассмотрим процедуру выбора частот для измерений tgδ. Для выбора этих частот предварительно расчет tgδ проводился с использованием параметра распределения λ=0,4-0,8.

На рис. 3.24 даны расчетные и экспериментальные зависимости tgδ от частоты для исходного и состаренного при температуре 85º С и времени старения 2000 часов. Как видно из рисунка старение приводит к уменьшению параметра распределения. Экспериментальные зависимости в отличие от теоретических не являются симметричными относительно частоты максимума $tg\delta_м$. В области частот, близких к частоте максимума ветви в расчетных и экспериментальных зависимостях симметричны и характеризуются одним значением параметра распределения. При этом для левой части наблюдается практически полное совпадение расчетных и экспериментальных значений tgδ. Поэтому необходимо для измерения tgδ на 2-х частотах выбирать f_1 и f_2 с участков, где вычисленные и расчетные значения совпадают.

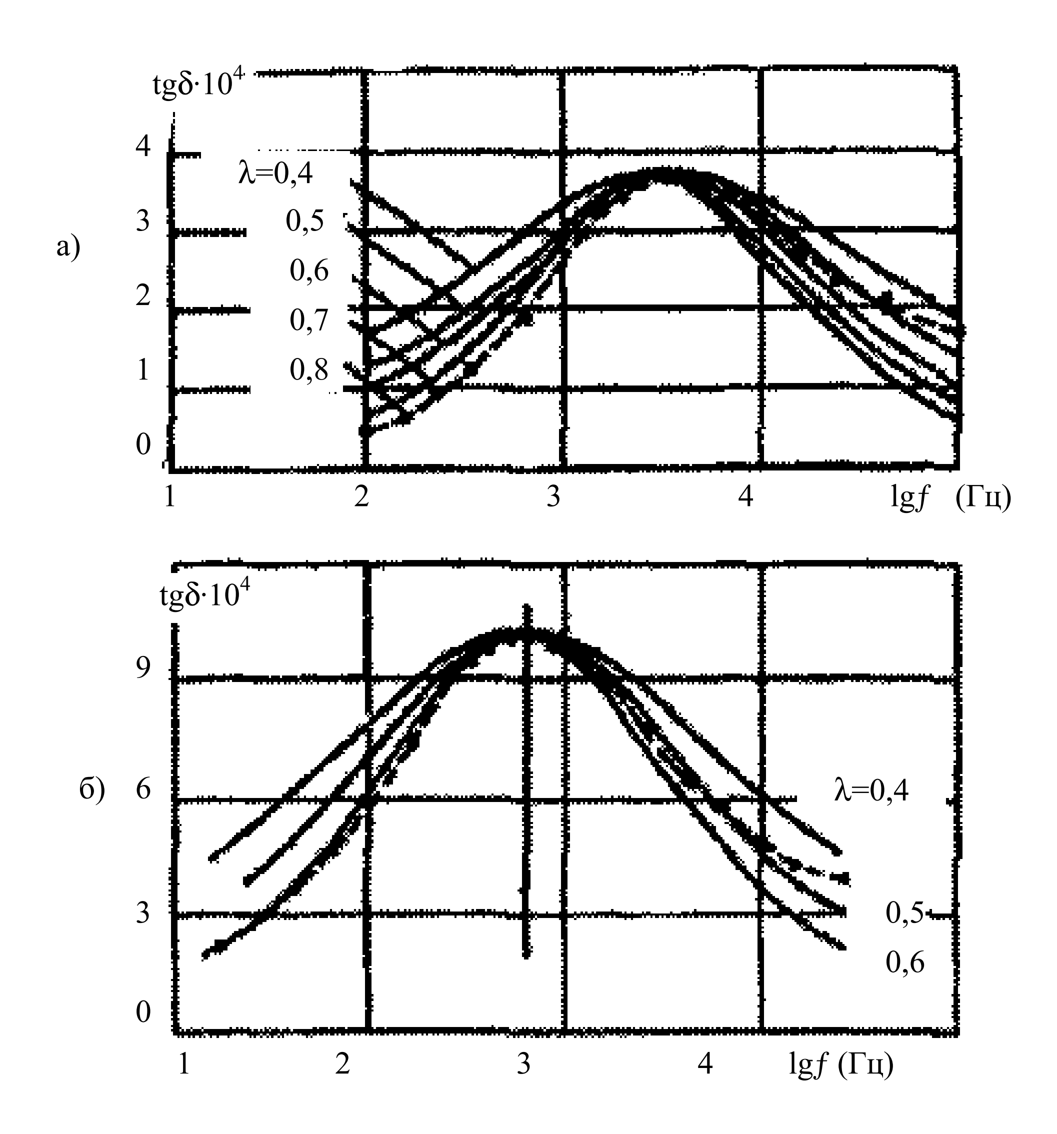


Рис. 3.24. Частотные зависимости tgδ для ПЭ 107-01К при Т=323К с различным параметром распределения релаксации: а) в исходном состоянии; б) после теплового старения в течение 2000 ч., _______ расчетные,_ _ _ _ _ экспериментальные.

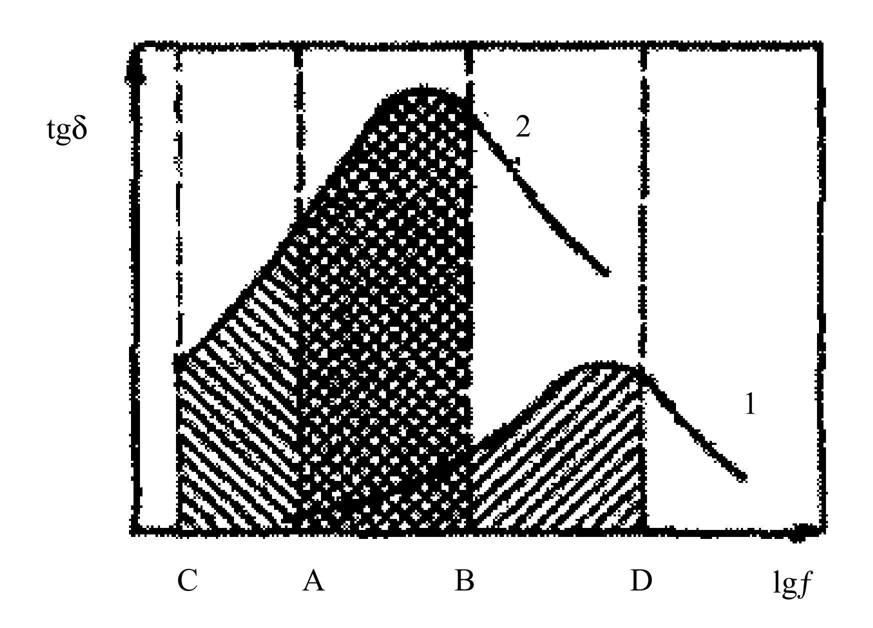


Рис. 3.25. Схема границ частотных диапазонов, рекомендуемых для измерения tgδ: BC – после старения 10000 ч старения; AD – после старения 20000 ч; AB – частотный диапазон, рекомендуемый для выбора частот измерения двух значений tgδ, необходимых для расчета $tg\delta_м$.

Границы частотного интервала, в котором следует выбирать частоты для измерения для определения далее ресурса кабеля, рекомендуется выбирать по следующей схеме, рис. 3.25. На этой схеме зависимость 1 соответствует частотной зависимости tgδ в исходном состоянии, зависимость 2 – частотной зависимости с полной выработкой ресурса. Для каждого вида кабеля такие зависимости должны быть известны заранее на основании проведенных исследований. Для измерения выбираем частоты в интервале, помеченном буквами AB на зависимости для исходного образца.

После измерения tgδ на частотах f_1 и f_2 рассчитывается $f_м$ и определяется параметр $\Delta f_м$. Затем для расчета наработанного ресурса используется для определения $\tau_н$ формула. Возможность определения

ресурса кабеля неразрушающим методом позволяет в процессе эксплуатации кабеля определить степень выработки ресурса и уделять большее внимание кабелям с малым остаточным ресурсом, тем самым повышая надежность работы кабельной сети.

Рассмотрим применение приведенной методики для определения остаточного ресурса кабелей различной полимерной изоляцией. Поливинилхлоридные пластикаты (ПВХП) изготавливаются на основе ПВХ смолы с различными добавками. В кабельной технике широкое применение нашли ПВХП изоляционные (и 40-13, И 50-13, И 40-14, И 50-41, нагревостойкий ИТ-195) и изоляционные для оболочек (ИО 50-11, ИО 45-12). Диэлектрические, физико-механические и другие показатели ПВХП хорошо известны.

ПВХ смолы, являясь полярными полимерами (ε_r=3,0-3,3), имеют повышенные потери (tg$\delta\approx$0.02 при 1 кГц), поэтому изоляция кабелей на их основе применяется на переменном напряжении до 660 В, а на постоянном – до 10 кВ.

Несмотря на значительное количество различных добавок, которые могут оказать влияние на свойства, ПВХП сохраняет основные свойства ПВХ смолы. Так, например, он имеет важное для нашего рассмотрения дипольно-групповые (ДГ) и ДС потери, т.е. такие же потери, как и рассмотренные в ПЭ и СПЭ. Частотная зависимость tgδ ПВХ показывает (рис. 3.26), что в диапазоне 10^3–10^5 Гц при нормальной температуре имеется максимум, обусловленный вкладом ДС и ДГ потерями.

Необходимо отметить, что пластификаторы не образуют с ПВХ смолой химического соединения и под влиянием тепла постепенно улетучиваются и ПВХП, окисляясь, ухудшает свои пластифицирующие свойства. Кроме этого в ПВХП под влиянием тепла и света происходят окислительные процессы, разрушающие макромолекулы ПВХ. В результате старения макромолекулы ПВХП становятся хрупкими, т.е. в результате

старения макромолекул ПВХП повышается его температура холодостойкости.

Таким, образом рассмотренные свойства ПВХП: дипольно-релаксационная поляризация с максимумом потерь, ДС и ДГ процессы; смещение максимума с изменением температуры и частоты; деструкция макромолекул под действием УФО (ультрафиолетового облучения) и тепла; окисление и улетучивание пластификатора, приводящие к хрупкости, т.е. повышению температуры холодостойкости позволяет использовать разработанный неразрушающий способ определения ресурса в условиях эксплуатации может быть применен и для кабелей с изоляцией из ПВХП.

Фторопластовая изоляция является дорогостоящей, поэтому находит применение для кабельных изделий с повышенной нагрево- и химической стойкостью. Изоляция из ПТФЭ (Ф-4) и его сополимеров Ф-4Д, Ф-4М, Ф-4МБ (ФЭП – фторированный этиленпропилен), Ф-40Д (ЭТФЭ – сополимер этилена и тетрафторэтилена), Ф-30 (ЭТФХЭ – сополимер этилена с трифторхлорэтиленом), Ф-2 и Ф-2М (ПВДФ – поливинилиденфторид) может

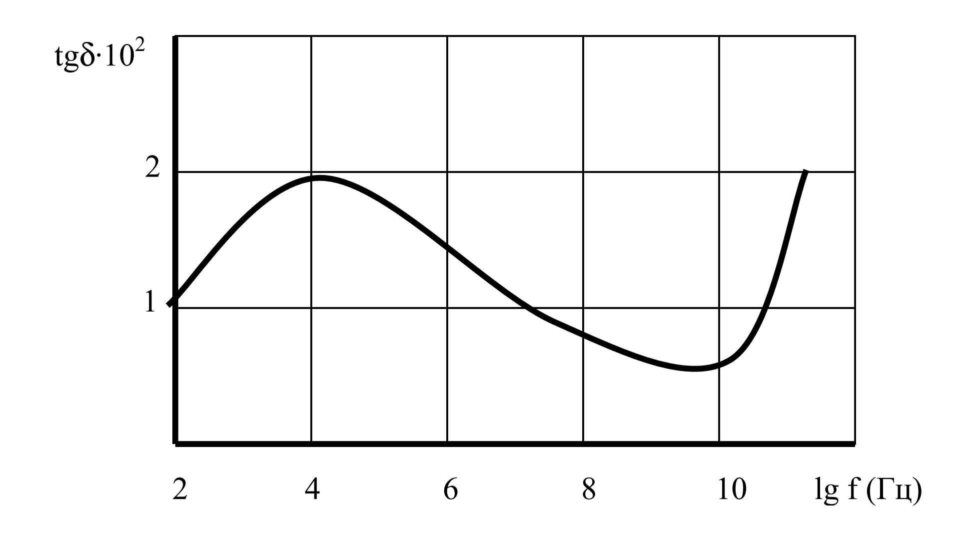


Рис. 3.26. Зависимость tgδ от частоты для ПВХП при 20º С.

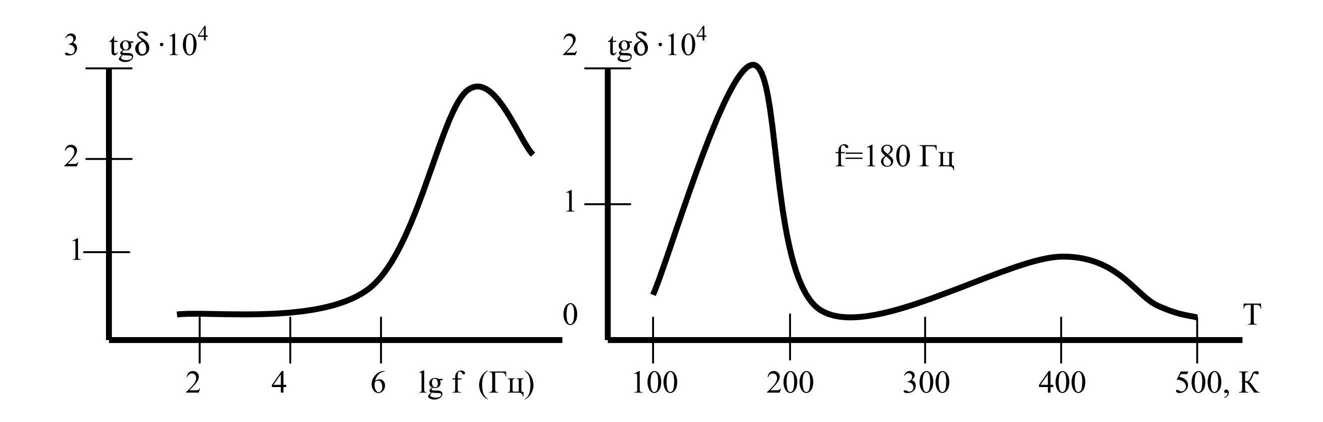


Рис. 3.27. Температурно-частотная зависимость tgδ для ПТФЭ.

быть наложена на жилу и провода различными способами: обмоткой лентами с возможной дальнейшей термообработкой, нитью, некоторые – методом экструзии. Свойства фторопластов хорошо известны. Фторопласты содержат большую часть кристаллической фазы; так у Ф-4 при 20º С она доходит до 90%. Температурно-частотные зависимости tgδ, (рис. 3.27 для Ф-4 и рис. 3.28 для Ф-3), имеет дипольно-релаксационные максимумы. В частотной зависимости максимум наблюдается при СВЧ, измерение которого для кабелей затруднено с учетом малых значений и больших длин кабелей. В температурной зависимости имеется острый пик максимума $tg\delta_м$, однако его величина не превышает значение $2 \cdot 10^{-4}$.

Фторопласты обладают малой стойкостью к электрическим разрядам (мала короностойкость) и стойкостью к радиации. При указанных видах воздействия идет деструкция молекул фторопластов с выделением газов и окислительными процессами. Под действием ЧР происходит эрозия полимера. Большую роль в эрозии играют окислительные реакции, инициированные разрядами, что приводит к увеличению концентрации СО-групп по всей толщине пленки.

Приведенные зависимости tgδ от температуры и частоты позволяют указать возможность применения предлагаемой методики для фторопластовой изоляции.

Резиновая изоляция находит применение для кабелей, обладающей высокой гибкостью. Резиновая смесь состоит из каучука натурального (НК) или синтетического (СК), вулканизирующего вещества, ускорителей вулканизации, мягчителей, наполнителей, антистарителей, красителей и других специальных добавок. Содержание каучука в резине колеблется от 30 до 40%. Свойства каучуков и кабельных резин детально изучены. В кабельной технике находят применение резины изоляционные (для изолирования жил и проводов) и изоляционно-защитные для оболочек. Изоляционные резины имеют следующие электрические свойства:

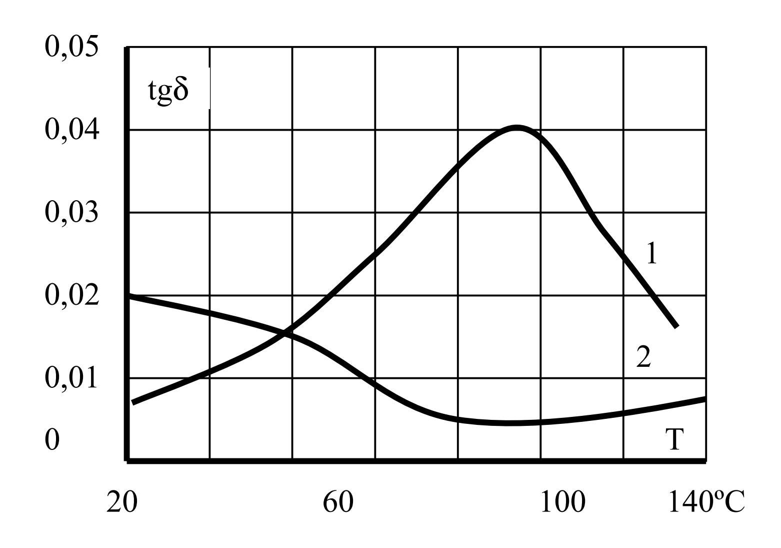


Рис. 3.28. Зависимость tgδ для Ф-3 от температуры:
1 – 10^6 Гц; *2* – 10^3 Гц.

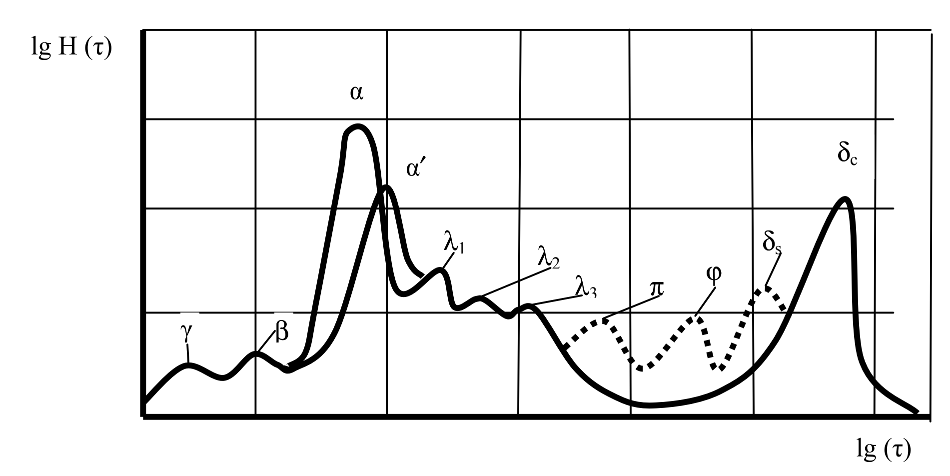


Рис. 3.29. Типичный релаксационный спектр линейного аморфного полимера (сплошная линия) при постоянной температуре и его изменения при сшивании и наполнении (пунктир).

$$\rho_v = 5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{12}\ \text{Ом м},\ \text{tg}\delta = 0{,}03 - 0{,}11;\ \varepsilon_r = 3{,}5 - 6{,}0;$$

$E_{пр}$=20–25 МВ/м. Учитывая это кабели с резиновой изоляцией находят применение при переменном напряжении до 0,66 кВ, при постоянном – до 6 кВ.

Кабельные резины на основе НК или СК с пластификаторами, наполнителями и другими спецдобавками имеют широкую гамму электрических, физических и химических свойств. Тем не менее с точки зрения рассматриваемых нами свойств они будут иметь следующие релаксационные процессы. Приведем их характеристики (рис. 23) в резине на основе сополимера и бутадиена и стирола (70:30) с 20% технического углерода П – 234 (табл. 3.12).

Каждое дискретное время, характеризующее данный релаксационный процесс, зависит от температуры и снижается при ее повышении:

$$\tau_i = B_i \cdot \exp(U_i / кT).$$

Релаксационные процессы полимера связаны: γ – процесс – с подвижностью боковых групп; β – процесс с подвижностью групп в кристаллической и аморфной фазах; α – процесс – с подвижностью сегментов, α′ – с подвижностью сегментов макромолекул, адсорбированных

поверхностью наполнителя; λ – переходы – с подвижностью надмолекулярных структур – наличием физической сетки; π – процесс – с подвижностью физических узлов различной природы; φ – процесс – с подвижностью наполнителя в среде полимера; δ – процесс – с релаксацией химических связей. В стеклообразном состоянии при $T<T_c$ в полимере существуют γ – и β – процессы с малой энергией активации. В высокоэластичном состоянии наибольшее влияние оказывают: α – процессы (ориентация сегментов, $(\tau = 10^{-6} - 10^{-3} c)$, перегруппировка надмолекулярных структур – λ – процессы $(\tau = 10^{2} - 10^{4} c)$, перегруппировка поперечных химических связей и связей в цепях, – δ – процесс $(\tau = 10^{7} - 10^{9}\,\text{с})$ и др. Здесь речь шла о механическом нагружении. В электрическом поле будут существовать эти же процессы. На примере СКН-40 можно убедиться в наличии дипольно-сегментального процесса т.е. α – перехода.

Таблица 3.12.

Характеристики релаксационных процессов.

Релаксационный процесс	Характерное время релаксации при 293 К τ_i, с	Энергия активации U_i, кДж/моль	Константа B_i, с
β	$1\cdot10^{-8}$	25	$5\cdot10^{-13}$
α	$6\cdot10^{-6}$	59	$5\cdot10^{-12}$
α′	$1\cdot5$	71	$4{,}8\cdot10^{-12}$
λ_1–λ_3	$1{,}6\cdot10^{2}$; $2{,}1\cdot10^{3}$; $4{,}3\cdot10^{4}$	55	$2{,}6\cdot10^{-8}$; $3{,}4\cdot10^{-6}$; $6{,}9\cdot10^{-6}$
φ	$2\cdot10^{5}$	74	$1{,}6\cdot10^{-8}$
δ	$4\cdot10^{9}$	126	$2\cdot10^{-13}$

В период хранения и эксплуатации кабельные резины подвергаются старению, главной причиной которого является окислительная деструкция содержащегося в резине каучука при воздействии кислорода, озона, тепла, света, агрессивных сред, механической нагрузки и др. Со временем верхние слои резины твердеют, образуются трещины, становятся хрупкими. При эксплуатации кабельные резины проходят три основные стадии старения: а) появление первых трещин; б) снижение эластичности (относительного удлинения) до 50% (в исходном состоянии: 200–350%); в) полная потеря эластичности. Для замедления старения резин применяются специальные добавки – антиоксиданты (противостарители).

В кабелях с изоляцией и оболочками из резин есть: а) дипольно-релаксационная поляризация, наибольший вклад в потери будет вносить α – переход (время релаксации 10^{-6}–10^{-3} с), т.е. ДС потери; б) окислительная деструкция, которая приведет к появлению новых полярных групп; они будут смещать местоположение максимума $tg\delta_м$ в температурно-частотной зависимости; в) снижение эластичности резиновой изоляции и оболочки в результате окислительной деструкции, что повысит температуру холодостойкости. Эти основные предпосылки дают основания для применения разработанного неразрушающего метода определения ресурса кабелей с резиновой изоляцией и оболочкой и проведения экспериментов для получения исходных данных для него.

Кабели с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой (маслянo-канифольной состав) до 35 кВ нашли широкое распространение в кабельных сетях. Свойства изоляционных бумаг, кабельных бумаг, пропиточных масс и кабелей с бумажной изоляцией опубликованы.

В качестве основного сырья при производстве изоляционных бумаг применяется древесная сульфатная целлюлоза (клетчатка). Молекулы целлюлозы представляют собой длинные полимерные цепи с коэффициентом полимеризации 1000–10000. Каждое глюкозное кольцо молекулы целлюлозы

содержит три гидроксила: OH, которые придают полярность целлюлозе. Это приводит к появлению максимума $tg\delta_м$ в области низких температур (рис. 3.30). Вязкая пропитка (масляно-канифольной компаунд) для бумажной изоляции имеет максимум $tg\delta_м$ в области повышенных температур (рис. 3.31), т.е. потери, связанные с α – процессом. Бумага, пропитанная масляно-канифольным компаундом, в температурной зависимости имеет два максимума $tg\delta_м$ (рис. 3.32) т.е. каждая составляющая (целлюлоза и компаунд) дает свой максимум.

При длительной работе бумажно-пропитанной изоляции происходит деструкция бумаги. При отсутствии влаги и кислорода происходит чисто термическая деструкция клетчатки: разрыв молекулярных цепей и снижение степени полимеризации. При наличии влаги может происходить гидролиз клетчатки: разрыв кислородных мостиков в молекуле и присоединение гидроксидов в местах разрыва. При гидролизе разрушение бумаги происходит при более низких температурах, чем чисто термическая деструкция.

В кабелях с вязкой пропиткой имеются воздушные включения (максимально до 3% по объему), что приводит к окислению клетчатки. В этой стадии при температурах 60–70ºС происходит окисление первичных гидроксильных групп до альгидных – $C\begin{smallmatrix}{\diagup\!\!\!\diagup O}\\{\diagdown H}\end{smallmatrix}$ или до карбоксильных $-C\begin{smallmatrix}{\diagup\!\!\!\diagup O}\\{\diagdown OH}\end{smallmatrix}$.

Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул клетчатки. Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:

$$\left(C_6H_{10}O_5\right)_n \xrightarrow{[O]} 6_n\,CO_2 + 5_n\,H_2O.$$

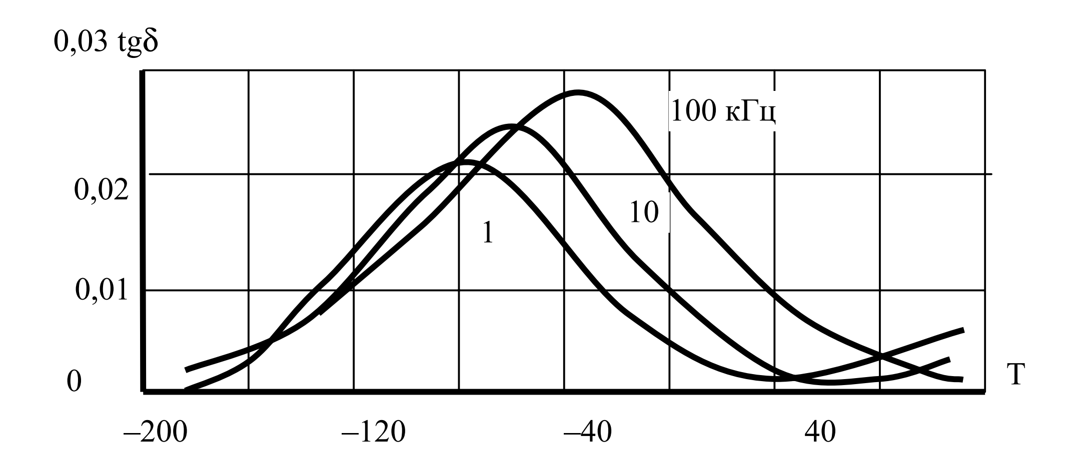


Рис. 3.30. Зависимость tgδ от температуры для высушенной

бумаги при разных частотах.

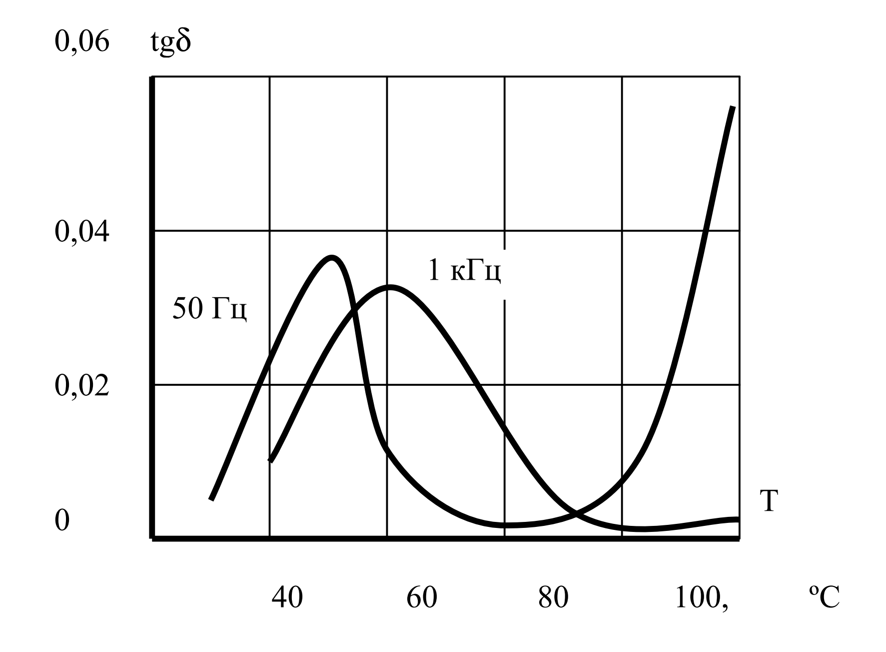


Рис. 3.31. Зависимость tgδ от температуры для масляно-канифольного компаунда.

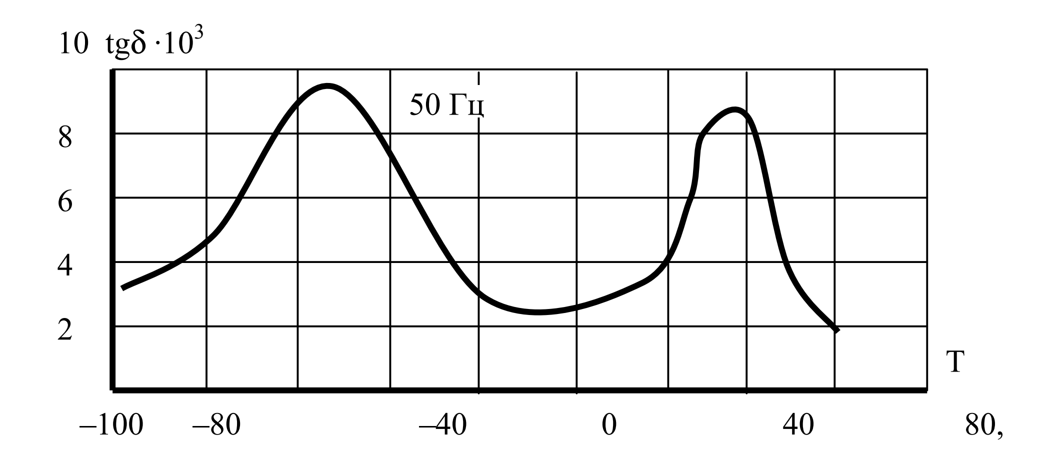


Рис. 3.32. Зависимость tgδ от температуры для бумаги, пропитанной масляно-канифольным составом.

При наличии ЧР в воздушных включениях в изоляции кабелей с вязкой пропиткой происходит разложение масла с выделением газов (преимущественно водорода) и твердого вещества ("Х–воск"). Для метановых углеводородов реакция идет следующим образом:

$$2C_nH_{2n+2} \rightarrow H_2\uparrow + C_{2n}H_{4n+2}.$$

жидкость твердое вещество

Кабельные изоляционные масла представляют собой очищенные нефтяные масла, состоящие из смеси жидких углеводородов: насыщенных метановых (парафиновых) C_nH_{2n+2} и нафтеновых C_nH_{2n}, образующих кольца, и ненасыщенных соединений – аромитических C_nH_{2n-m}, состоящих из бензольных колец C_6H_6 в различных сочетаниях. Необходимо отметить, что медь (токопроводящей жилы) и свинец (оболочки) служат катализатором окисления пропиточной массы, что приводит к возрастанию tgδ.

Выделение газов увеличивает интенсивность ЧР с переходом их в критические с величиной заряда $q_{чр} \cong 10^{-8}$–10^{-7}Кл, что приводит к локальному повышению температуры и возрастанию термической деструкции клетчатки. Например, под действием электрического поля порядка 30 кВ/мм и

температуры 50°C происходит разложение пропитанной бумаги с выделением следующих газов: H_2–55%, CO_2–36%, CO–9%.

Проникновение влаги в бумажно-масляную изоляцию существенно ускоряет процесс деструкции (увеличение проводимости, рост температуры и т.д.).

Апробация предлагаемого метода оценки остаточного ресурса подтвердила возможность его использования для кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

ГЛАВА 4. СПОСОБЫ РАСПОЗНАВАНИЯ АНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

4.1. Общие подходы к распознаванию анормальных режимов.

Важнейшим фактором предотвращения перехода физического дефекта в оборудовании в катастрофический отказ, эскалации системных аварий является своевременное выявление анормальных режимов электроустановок и электрических систем. В настоящей главе делается анализ анормальных режимов генератора, электрических систем и первичных признаков, характеризующих эти состояния. Проводится анализ воздействия на дефекты электрооборудования и анализ первичных признаков перенапряжений в сети. К разряду анормальных состояний оборудования целесообразно отнести разгерметизацию камер вакуумных выключателей. Действительно опыт обследования показывает, что после разгерметизации одной из фаз вакуумный выключатель длительное время может нормально функционировать. Причины такого положения будут показаны в этой главе. Необходимость в более пристальном внимании к проблеме потери вакуума подтверждается тем, что среди всех причин отказов разгерметизация занимает доминирующее положение (Рис. 4.1). На рис. 4.2 показаны характеристики, которые показывают, как изменяется число коммутаций до потери вакуума в зависимости от величины отключаемого тока. Увеличение коммутируемого тока снижает ресурс. Другими словами работа выключателя в более тяжелых условиях по току требует более интенсивного контроля Перечисленные исследования, проведенные автором, получили отражения в большом количестве публикаций, в том числе в , и явились основой для разработки методических основ оценки состояния электрооборудования.

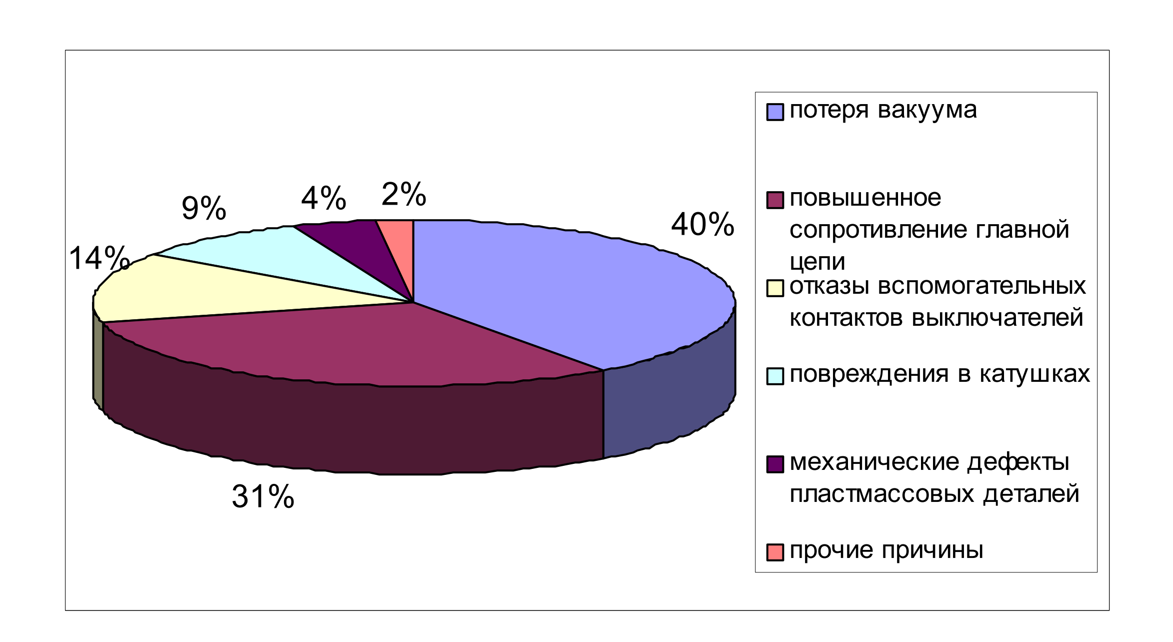


Рис. 4.1. Причины отказов вакуумных камер

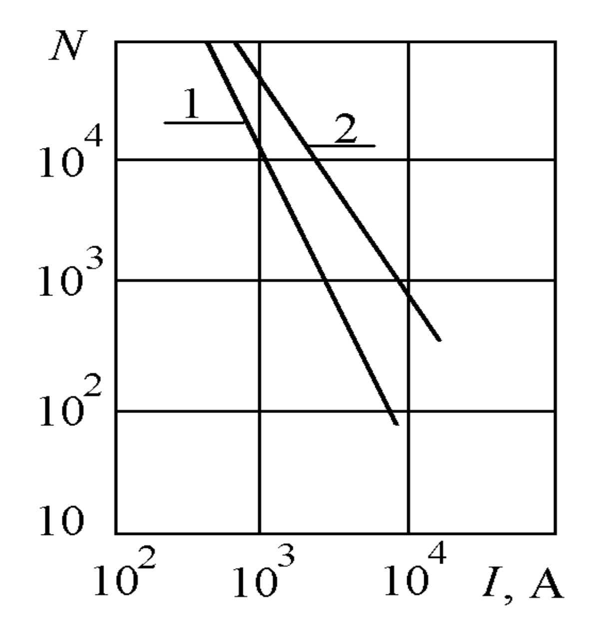


Рис. 4.2. Зависимость числа коммутаций до потери вакуума от величины отключаемого тока: 1 – для выключателя ВВ/ТЕЛ-10-8/80; 2 – для выключателя ВВ/ТЕЛ-10-125/800

Исходным моментом для распознавания является информационный анализ процессов, причем исследования показывают, что наиболее приемлемым, применительно к анормальным режимам генераторов, является представление процессов в виде комплексных сигналов.

В большинстве практических случаев можно отметить следующие особенности анормальных режимов: а) значительное отклонение частоты от номинальной является маловероятным событием; б) всегда выполняется условие $\Delta f \,/\, f_{c\ p} << 1$, где $f_{c\ p} = (f_1 + f_2)\ \frac{1}{2}$ – средняя частота токов и напряжений при двухчастотном асинхронном ходе; в) изменение токов и напряжений по амплитуде и фазе в любом сечении энергосистемы происходит значительно медленнее по сравнению с колебаниями f_{cp}.

Перечисленные особенности позволяют представить любой анормальный режим узкополосным процессом, когда удобным является его изображение на комплексной плоскости. Основой для такого представления является преобразование Гильберта. Прямое и обратное преобразования Гильберта определяют действительную и мнимую составляющие комплексного сигнала:

$$\hat{y}(t) = \chi[\,y(t)\,] = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} y(\tau)(t-\tau)^{-1}d\tau$$

$$y(t) = \chi^{-1}[\,\hat{y}(t)\,] = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \hat{y}(\tau)(t-\tau)^{-1}d\tau$$

Пусть действительная функция представляет собой синусоидальный ток (аналогично напряжение)

$$i(t) = I_m cos(\omega t) = I_m cos\Phi,$$

где I_m, ω, Φ – амплитуда, частота и фаза.

Используя прямое преобразование к действительной функции $i(t)$ и, учитывая, что интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} cos[\omega(t-\tau)](t-\tau)^{-1} d\tau$$

равен нулю, а интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} sin[\omega(t-\tau)](t-\tau)^{-1} d\tau$$

равен π, найдем функцию

$$\hat{i}(t) = -\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} I_m cos\omega\tau(t-\tau)^{-1} d\tau = I_m sin\omega t.$$

Аналогичное преобразование функции $sin\omega\tau$ дает сопряженную функцию $cos\omega\tau$. Сумма $i(t)$ и $\hat{i}(t)$ представляет собой распространенную в теории электрических цепей символическую запись

$$\dot{I}(t) = I_m cos\omega t + jI_m sin\omega t = I_m exp(j\Phi),$$

где $\dot{I}(t)$ представляет собой вектор длиной I_m, вращающийся с угловой скоростью ω.

Отметим наиболее характерные особенности преобразования Гильберта: преобразование линейно и, следовательно, возможно использование свойства суперпозиции; мнимая часть $Im[\dot{I}(t)] = \hat{i}(t)$ сдвинута относительно исходной функции $i(t)$ на $\frac{\pi}{2}$; функции $i(t)$ и $\hat{i}(t)$

являются сопряженными по Гильберту, причем, если $i(t)=I_m sinwt$, то $\hat{i}(t) = -Imcos\omega t$.

Распространим приведенные преобразования на более сложные процессы.

Пусть процесс представлен рядом Фурье

$$i(t) = \sum_{r=1}^{\infty}(\alpha_r \cos\omega_r t + \beta_r \sin\omega_r t),$$

где $\alpha_r = \frac{2}{T}\int_0^T i(t)\cos(r\omega_1 t)dt,\ \beta_r = \frac{2}{T}\int_0^T i(t)\sin(r\omega_1 t)dt,$ – коэффициенты ряда Фурье; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – основная частота.

Прямое преобразование по Гильберту дает выражение

$$\hat{i}(t) = \sum_{r=1}^{\infty}(\alpha_r \sin\omega_r t - \beta_r \cos\omega_r t)\ .$$

Функция

$$\dot{I}(t) = i(t) + \hat{i}(t) = I_m(t)exp[\,j\Phi(t)]$$

в теории преобразования и передачи сигналов получила название комплексного сигнала. Непериодическая функция $i(t)$ может быть записана через интеграл

$$i(t) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}[\alpha(\omega)\cos\omega t + \beta(\omega)\sin\omega t]d\omega\ ,$$

где ω – текущая частота, на которую заменяются дискретные значения частоты $r\omega_1$ при переходе от ряда к интегралу Фурье при $T \to \infty$.

Применяя преобразование Гильберта, получаем

$$\hat{i}(t) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}[\alpha(\omega)\sin\omega t - \beta(\omega)\cos\omega t]\,d\omega,$$

что опять позволяет синтезировать комплексный сигнал

$$\dot{I}(t) = I_m(t)\exp[j\Phi(t)] \quad . \qquad (4.1)$$

Сигнал $\dot{I}(t)$ представляется на комплексной плоскости вектором, длина которого равна

$$I_m(t) = \sqrt{i^2(t) + \hat{i}^2(t)}$$

и углом

$$\Phi(t) = arc\,tg\frac{\hat{i}(t)}{i(t)}.$$

Частота колебаний $\omega(t)$ связана с углом $\Phi(t)$ зависимостью

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt}arc\,tg\frac{\hat{i}(t)}{i(t)}$$

В частности, если изменение угла $\Phi(t)$ равномерно, то

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega_o = const$$

Аналогичные рассуждения справедливы для напряжения и отношений комплексных сигналов, которые будут использованы для анализа дальше.

На несимметричные режимы, как правило, накладываются в/ч гармонические составляющие, что весьма существенно затрудняет

проведение измерений первичных признаков. В общем случае первичный сигнал включает в себя сумму величин

$$e(t) = e_o(t) + e_\nu(t) = E_{mo} sin(\omega_o t + \varphi_o) + \sum_{\nu=3}^{m} E_{m\nu} sin(\omega_\nu t + \varphi_\nu) \ ,$$

где E_{mo}, φ_o и $E_{m\nu}$, φ_ν – амплитуды и фазы слагаемых основной частоты и ω_o и высокочастотных гармоник $\omega_\nu = \omega_o \nu$, $\nu = 3, 5, 7,...$ – номер гармоники. Составляющая $e_\nu(t)$ является суммой нечетных гармоник, возникающих из-за нелинейных элементов энергосистем. Такое представление $e(t)$ остается справедливым как для фазных или междуфазных токов и напряжений, так и их симметричных составляющих. Поэтому одной из основных задач при измерении первичных признаков является разработка методов, обеспечивающих минимизацию погрешности, которая может быть оценена величиной затухания

$$a(\omega) = 20lg[A(\omega)]^{-1}, \qquad (4.2)$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика. Задача сводится к тому, чтобы минимизировать величину суммарного сигнала на выходе датчика несимметрии в исходном нагрузочном режиме.

4.2. Распознавание анормальных режимов генератора.

Многочисленные исследования, проведенные при участии автора, показали, что наиболее целесообразным при распознавании аномальных режимов генератора является комплексный сигнал, найденный как отношение напряжения к току на выводах статора.

Исходным является представление тока, напряжения и их отношений в виде комплексного сигнала, полученного для тока (4.1).

$$\dot{U}(t) = U_m(t) exp[\Phi_u(t)] \qquad (4.3)$$

$$\dot{Z}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = \frac{U_m(t)}{I_m(t)} exp\{\ j[\Phi_u(t) - \Phi_i(t)]\} = Z(t) exp[j\varphi(t)]\ . \qquad (4.4)$$

Приведенные комплексные сигналы, изображенные графически на комплексной плоскости, определяют двумерное пространство состояний. Кривая, которую описывает конец вектора, называется годографом, а, учитывая, что отношение напряжения к току имеет размерность сопротивления, то она называется годографом сопротивления.

На рис. 4.3 представлено изменение во времени электрических величин на выводах обмотки статора при асинхронном ходе в результате потери возбуждения турбогенератора мощностью 300 МВт: 1, 2, 3 – огибающие амплитуд тока $I_m(t)$, напряжения $U_m(t)$ и фазы между током и напряжением $\Phi(t)$, найденные в результате математического моделирования; 4 – годограф сопротивления, построенный по результатам математического моделирования; 5, 6, 7 – граничные линии зон контроля. Показано также определение точки на комплексной плоскости в момент времени $t = 1{,}1$ *с*, которая отстоит от начала координат на расстоянии $U_m(1{,}1) \cdot I_m^{-1}(1{,}1)$, а вектор, соединяющий начало координат с точкой, располагается под углом $\Phi(1{,}1)$. Таким образом, пользуясь преобразованием Гильберта, процессы

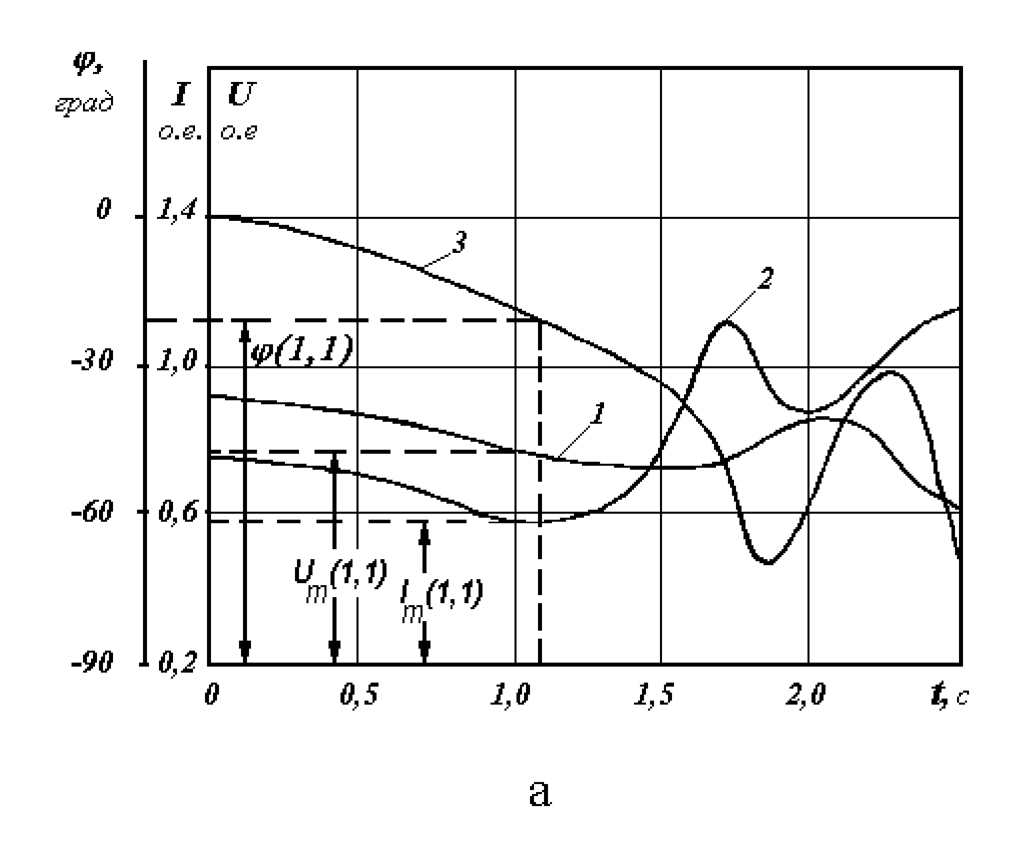
произвольной формы можно представить как колебания с меняющимися во времени огибающей амплитуд и фазой. Приведенные соображения позволяют определить характер изменения сигналов при анормальных режимах по найденным огибающим тока $I_m(t)$, напряжения $U_m(t)$, фазы $\varphi(t)$ между током и напряжением.

Задача отыскания огибающих тока и напряжения и фазы между током и напряжением является сложной научно-технической проблемой моделирования и натурных испытаний. Задача многократно решалась автором и при участии автора для различных энергетических предприятий и отражена в большом количестве публикаций.

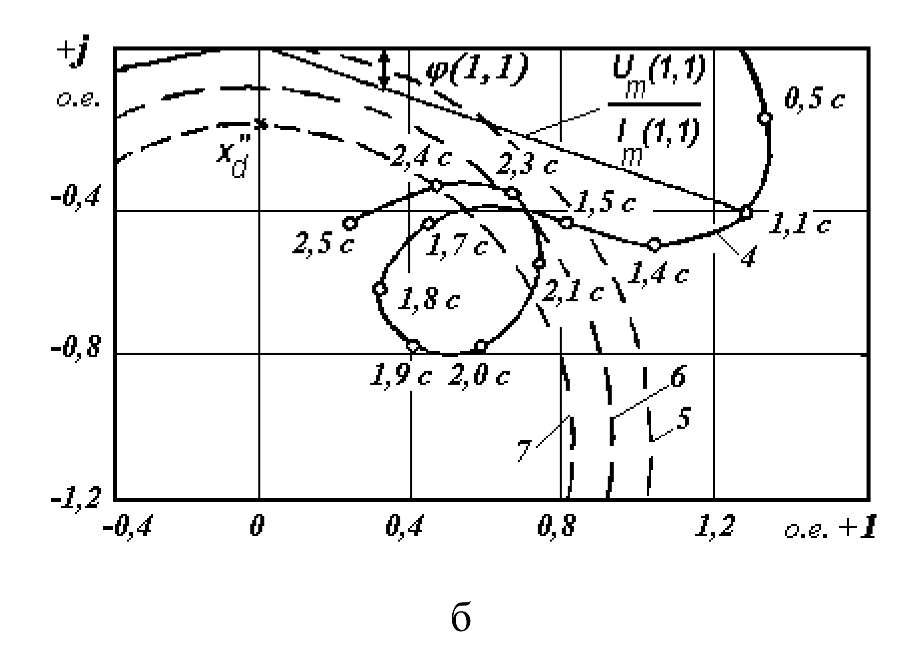
Расчетная схема показана на рис. 4.4. Система представлена шинами бесконечной мощности с напряжением V_C , параллельно с ней через сопротивления связи R_C и X_C работают два турбогенератора. На турбогенераторе G_2 моделируются процессы потери возбуждения, а G_1 эквивалентирует все остальные генераторы. На обоих генераторах учитывается автоматический регулятор возбуждения и регулятор скорости турбин.

Определение огибающих осуществляется на основе решения систем алгебраических уравнений для вычисления d и q составляющих напряжений в узлах, системы дифференциальных уравнений переходных процессов.
n – номер узла расчетной схемы.

Система алгебраических уравнений решается методом Гаусса, а система дифференциальных уравнений генератора и асинхронного двигателя осуществляется методом Рунге-Кутта четвертого порядка с автоматическим выбором шага



а



б

Рис. 4.3. Пример построения годографа сопротивления на основе преобразования Гильберта

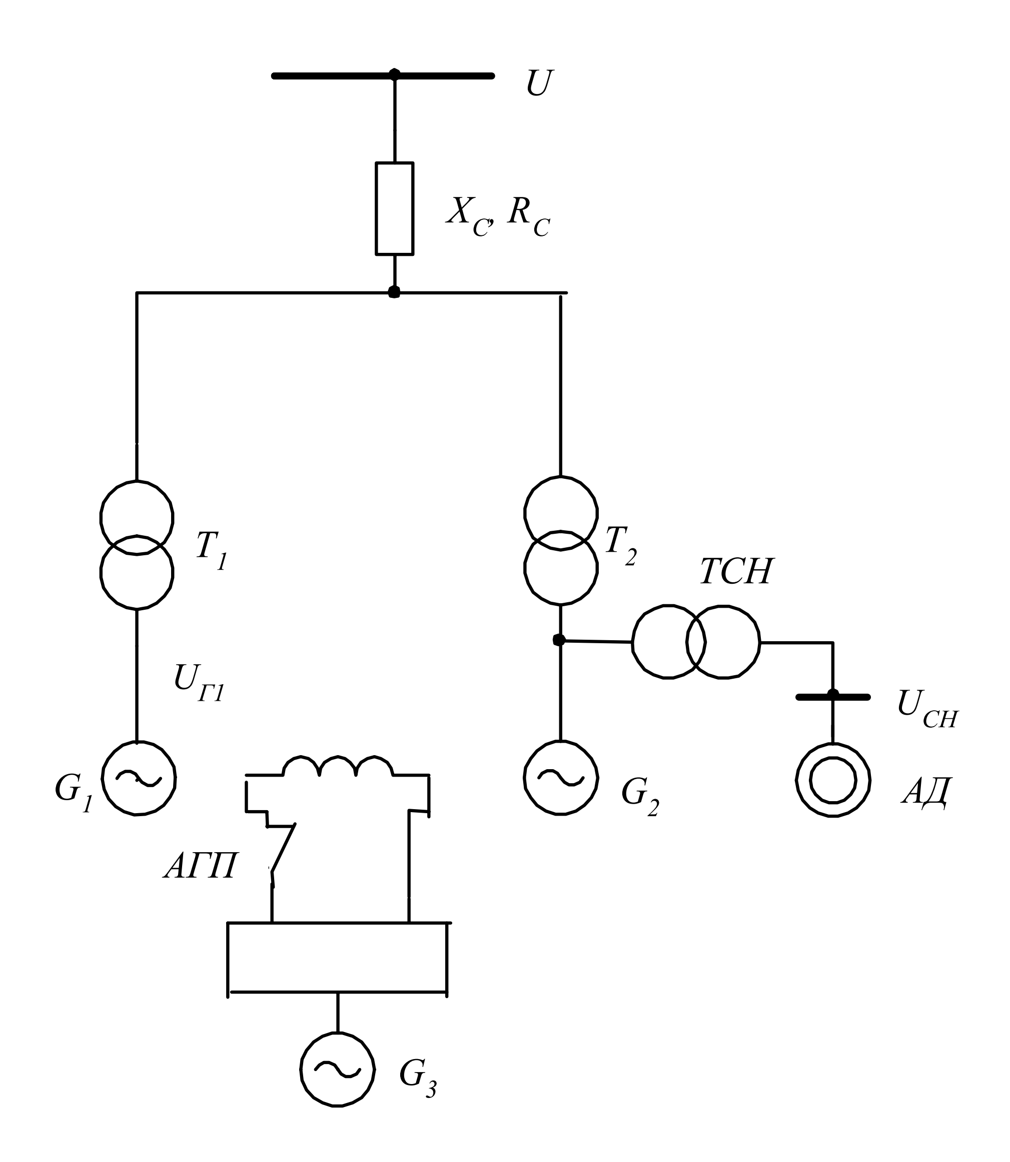


Рис. 4.4. Расчетная схема для исследования асинхронного режима генератора

С помощью математической модели возможно моделирование следующих состояний обмотки возбуждения:

1. Обрыв обмотки возбуждения.

2. Замыкание обмотки возбуждения на гасительное сопротивление и накоротко.

3. Замыкание обмотки возбуждения на выпрямители.

4. Частичная потеря возбуждения из – за неправильного действия АРВ или выхода из строя части выпрямителей.

При ложном отключении АГП обмотка возбуждения сначала размыкается, а затем через определенный промежуток времени автоматически замыкается на сопротивление синхронизации.

Замыкание обмотки возбуждения на выпрямительное устройство приводит к тому, что она оказывается периодически или замкнутой накоротко или разомкнутой. Моделирование разомкнутого состояния обмотки возбуждения осуществляется следующим образом. В момент перехода тока возбуждения через нуль исключается дифференциальное уравнение обмотки возбуждения из числа решаемых и считается, что генератор не имеет обмотки возбуждения

$$p\Psi_f = \frac{1}{T_{d0}}(E_f - E_q), \qquad (4.5)$$

где ψ_f – потокосцепление обмотки возбуждения; E_f – напряжение обмотки возбуждения; E_q – э.д.с., индуктируемая в статоре током обмотки возбуждения; T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых контурах статора и ротора.

Отключение АГП моделируется введением в цепь обмотки возбуждения напряжения

$$p\psi_f = \frac{1}{T_d}(E_f - U_{АГП} - E_q), \quad (4.6)$$

где T_d – постоянная времени обмотки возбуждения с учетом ее состояния; $U_{АГП}$ – падение напряжения на дуге АГП.

Численное значение $U_{АГП}$ принимается равным в соответствии с принципами гашения коротких дуг и рекомендациями о допустимой кратности перенапряжения при срабатывании АГП. В расчетах значение АГП принимается равным

$$U_{АГП} = (3 \div 5)U_{fн},$$

где $U_{fн}$ – номинальное напряжение обмотки возбуждения.

После размыкания обмотки возбуждения напряжение на ее зажимах определяется методом численного дифференцирования с использованием алгебраического уравнения для потокосцепления обмотки возбуждения с учетом того, что $E_q = 0$

$$\psi_f = \mu_d \chi_d i_d + g_f \sum_{i=1}^{8} E_{rqi}, \quad (4.7)$$

$$U_f = -\frac{d\psi_f}{dt} = \frac{\psi_f(t+h) - \psi_f(t)}{h}, \quad (4.8)$$

где U_f – напряжение на зажимах обмотки возбуждения, индуктируемое токами статора и демпферными контурами; $\psi_f(t)$, $\psi_f(t+h)$ – потокосцепление обмотки возбуждения в момент времени t и $(t + h)$; h – шаг численного интегрирования.

Зная численное значение U_f на каждом шаге численного интегрирования, можно достаточно точно определить последующий режим обмотки возбуждения.

Таким образом, обобщая вышесказанное, видно, что случаи потери возбуждения моделировались следующим образом.

1. Обрыв обмотки возбуждения моделировался введением в уравнении (4.6) напряжения $U_{АГП}$ с одновременным уменьшением постоянной времени T_d.

2. Замыкание обмотки возбуждения накоротко осуществляется приравниванием в уравнении (4.6) $E_f = 0$; $U_{АГП} = 0$; $T_d = T_{d0}$. Замыкание обмотки на гасительное сопротивление подобно случаю замыкания накоротко, только $T_d = T_{d0} / (1 - K_f)$, где $K_f = \frac{r}{R_f}$ – кратность гасительного сопротивления.

3. При замыкании на выпрямительное устройство обмотка возбуждения оказывается периодически замкнутой накоротко ($r = 0$ при $E_q > 0$) или разомкнутой ($E_q = 0$). Момент перехода тока возбуждения через нуль определяется по знаку напряжения U_f (уравнение (4.8)). Если $U_f < 0$ – проводящее состояние выпрямительного устройства ($E_q > 0$), $U_f \geq 0$ – непроводящее состояние выпрямительного устройства ($E_q = 0$).

4. Выход из строя части выпрямителей или ограничения тока ротора при повреждении регулятора возбуждения, моделируется быстрым уменьшением напряжения возбуждения.

Для исследования таких переходных процессов как синхронные качания и асинхронный режим генератора с возбуждением при расчетах используются уравнения, описывающие действие автоматического

регулятора возбуждения (АРВ):

$$pE_f = \frac{1}{T_в}[(1+S_T)^{\alpha p}U_{рег} - E_f], \qquad (4.9)$$

$$U_{рег} = E_{f0} + K_U(U_r - E_{f0}) + K_I I_I;$$

где $U_{рег} \le U_{рег\ макс}$; K_U, K_I – коэффициенты усиления в каналах по отклонению напряжения и тока; E_{f0} – начальное напряжение возбуждения; $T_в$ – постоянная времени возбудителя.

Гидродинамическая система регулирования турбины описывается дифференциальным уравнением для выходного сигнала электрогидравлического преобразования движения сервомотора

$$p\rho_З = \frac{1}{T_S}(\eta_0 - \mu_{ЦВД} - \frac{S_r}{\delta_p} - \rho_\gamma), \qquad (4.10)$$

где $1 \le \rho_З \le 0{,}3$; $p\mu_{ЦВД} = \frac{1}{T_S}\rho_З$;

$$0 \le \mu_{ЦВД} \le 1;\ V_{зак} \le p\mu_{ЦВД} \le V_{ОТК};$$

$$pM_{перв} = \frac{1}{T_p}(\mu_{ЦВД} - M_{перв});$$

$\rho_З$ – открытие побуждающего золотника, η_0 – сигнал задатчика мощности от механизма изменения частоты вращения, $\mu_{ЦВД}$ – открытие сервомотора цилиндра высокого давления, δ_p – статизм регулятора частоты вращения,

$V_{закр}$, $V_{откр}$ – ограничение по скоростям закрытия и открытия сервомотора, $T_з$, $T_в$ – время сервомотора и постоянная времени отсечного золотника, $T_р$ – эквивалентная постоянная времени энергоносителя, учитывающая паровые объемы в тракте турбины, $M_{перв}$ – момент турбины без учета саморегулирования.

Структурная схема, реализующая комплексное моделирование, представлена на рис. 4.5. Программа состоит из основной (MAIN) и ряда программ (SUBROUTINE). Подпрограмма NORM предназначена для расчета исходного установившегося режима. Определяются начальные значения интегрируемых переменных при $t = 0$.

Подпрограмма PRAAW включает в себя расчет переменных коэффициентов матрицы алгебраического уравнения, а также решение системы алгебраических уравнений методом Гаусса. В этой подпрограмме моделируется регулятор возбуждения, а также регулятор частоты (4.10). Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге – Кутта с помощью подпрограммы RGKUT. В основной программе MAIN производится описание величин и ввод исходных данных, осуществляется запуск подпрограмм, смоделирована логика потери и восстановления возбуждения. Подпрограмма ZONA 1 – ZONA 8 – моделируют различные виды алгоритмов выявления потери возбуждения. Подпрограмма GRAF осуществляет построение графиков, а с помощью подпрограммы GODOGRAF рисуется годограф сопротивления в комплексной плоскости $X – R$.

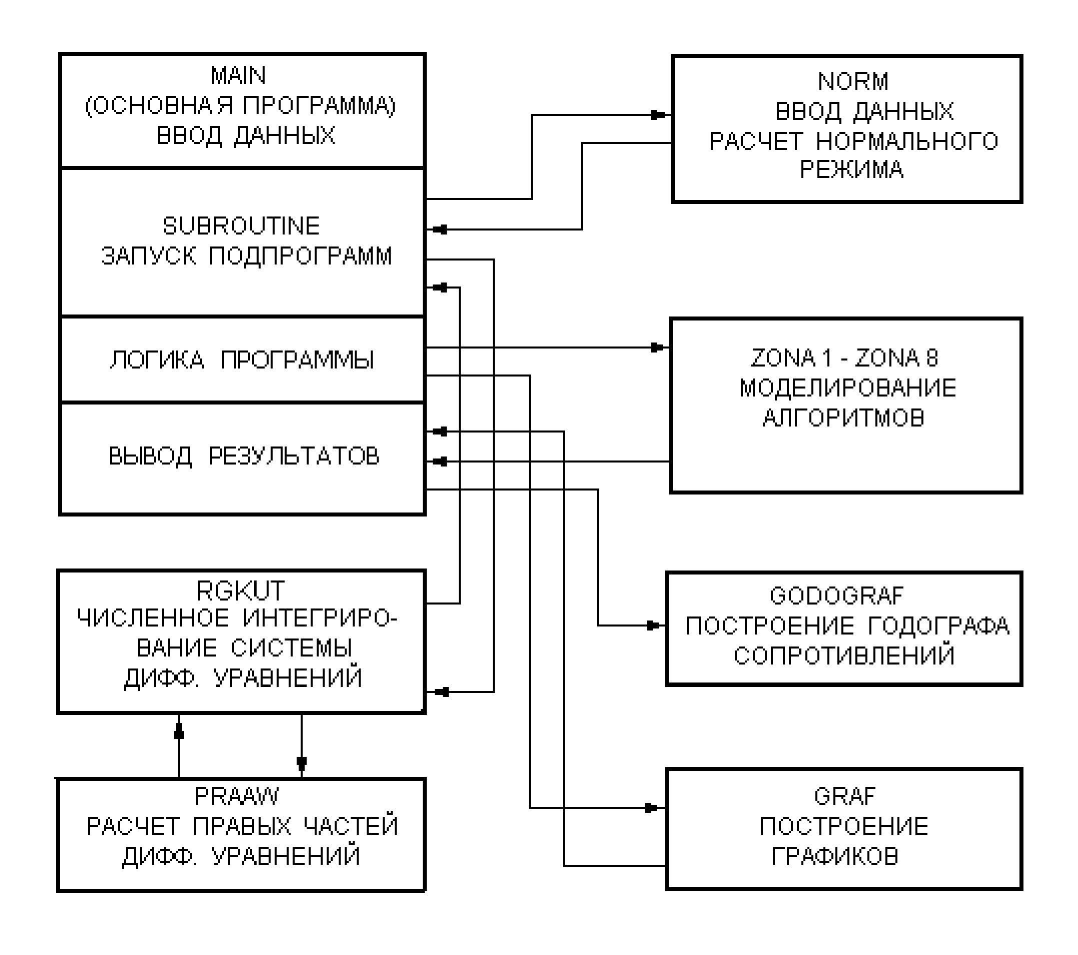


Рис.4.5. Структурная схема программы расчета переходных процессов и построения их графиков

На рис. 4.6 – 4.9 показаны некоторые результаты моделирования. Анализ наиболее характерных признаков потери устойчивости показал следующие характерные особенности их изменения.

Все величины носят колебательный характер, причем анализ токов и напряжений на выводах обмотки статора, тока возбуждения, активной и реактивной составляющих мощностей показал, что их амплитуды превышают предельные, ограниченные установками традиционных устройств.

Так на рис. 4.9 построен годограф сопротивления на выводах турбогенератора мощностью 120 МВт при замыкании обмотки возбуждения на сопротивление. Видно, что годограф сопротивления колеблется относительно частотной характеристики генератора 1 и относительно традиционных уставок 3, что приводит к отказу выявления потери возбуждения. Аналогичные исследования проводились применительно к генераторам Калининской АЭС, Березовской ГРЭС, ТЭЦ – 2 Красноярскэнерго, Петрозаводской ТЭЦ, Псковской ГРЭС, Токтогульской ГЭС Киргизэнерго, которые подтверждают приведенные выводы.

Сравнительный анализ первичных признаков анормальных режимов генераторов показал, что наиболее предпочтительным признаком с позиций обеспечения селективности, чувствительности и быстродействия выявления является сопротивление на выводах обмотки статора.

Изменение измеряемых сигналов во времени анализируется относительно определенных граничных линий. Обобщая исследования при различных анормальных режимах можно выделить следующие характерные особенности процессов относительно граничных линий.

Анализ анормальных режимов позволяет выделить ряд характерных особенностей изменения первичных признаков, по существу определяющих алгоритмы распознавания. Причем в качестве величины несущей информацию используется комплексный сигнал $\dot{Z}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t)}$.

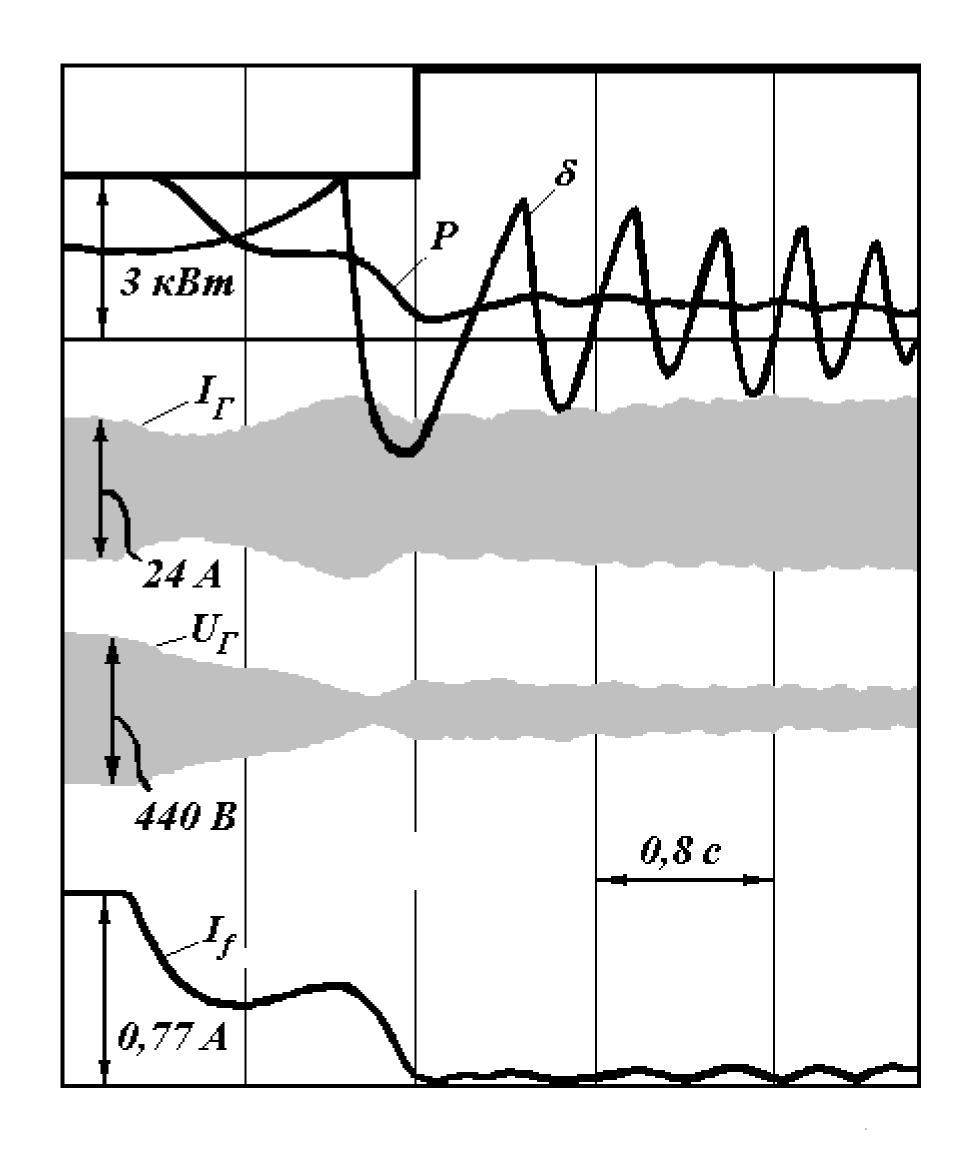


Рис.4.6. Графики процессов при моделировании асинхронного хода при потере возбуждения при P = 0,6 $P_Н$ и потреблении Q

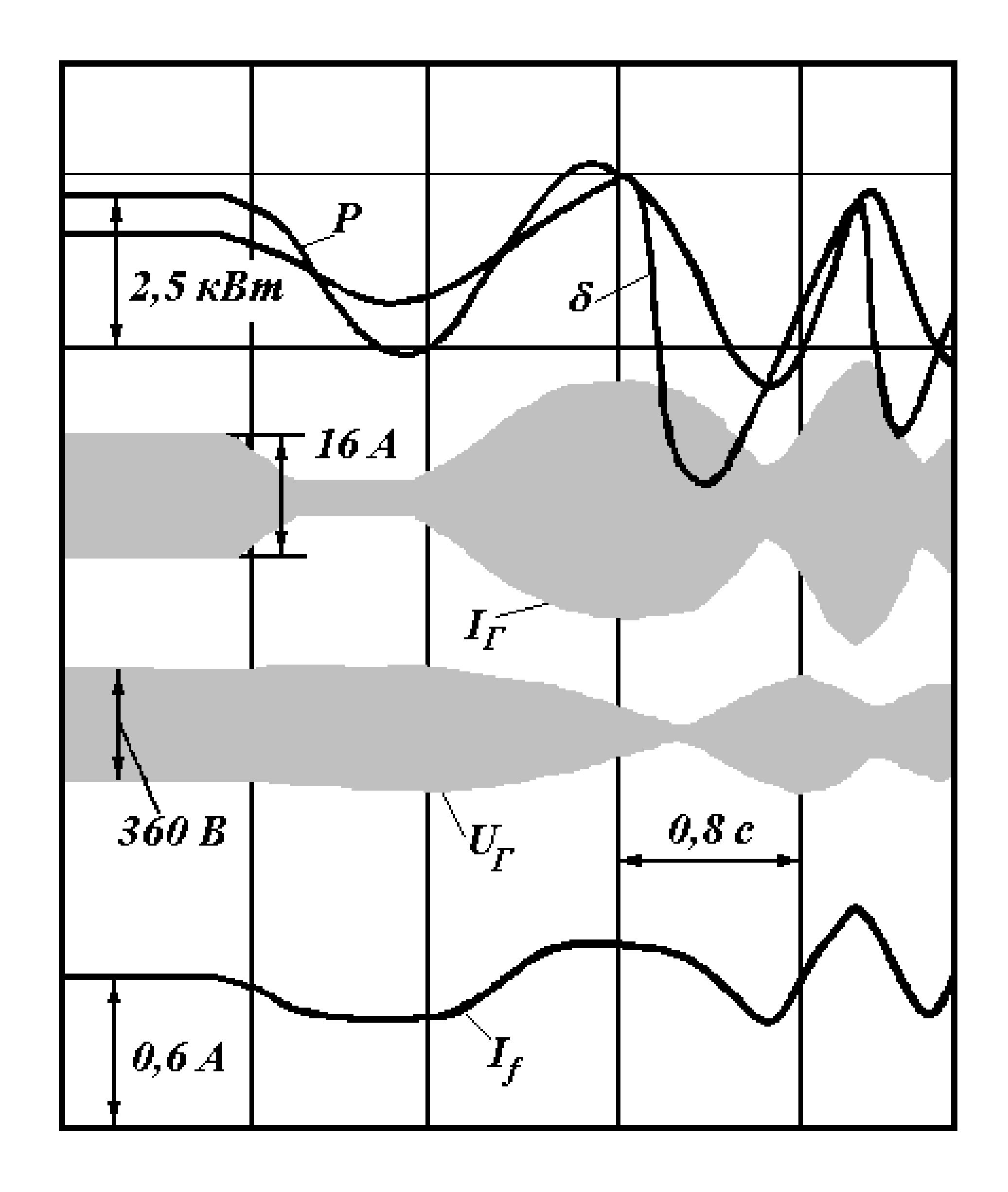


Рис.4.7. Графики процессов при моделировании асинхронного хода возбужденного генератора при P = 0,5 $P_Н$ на физической модели

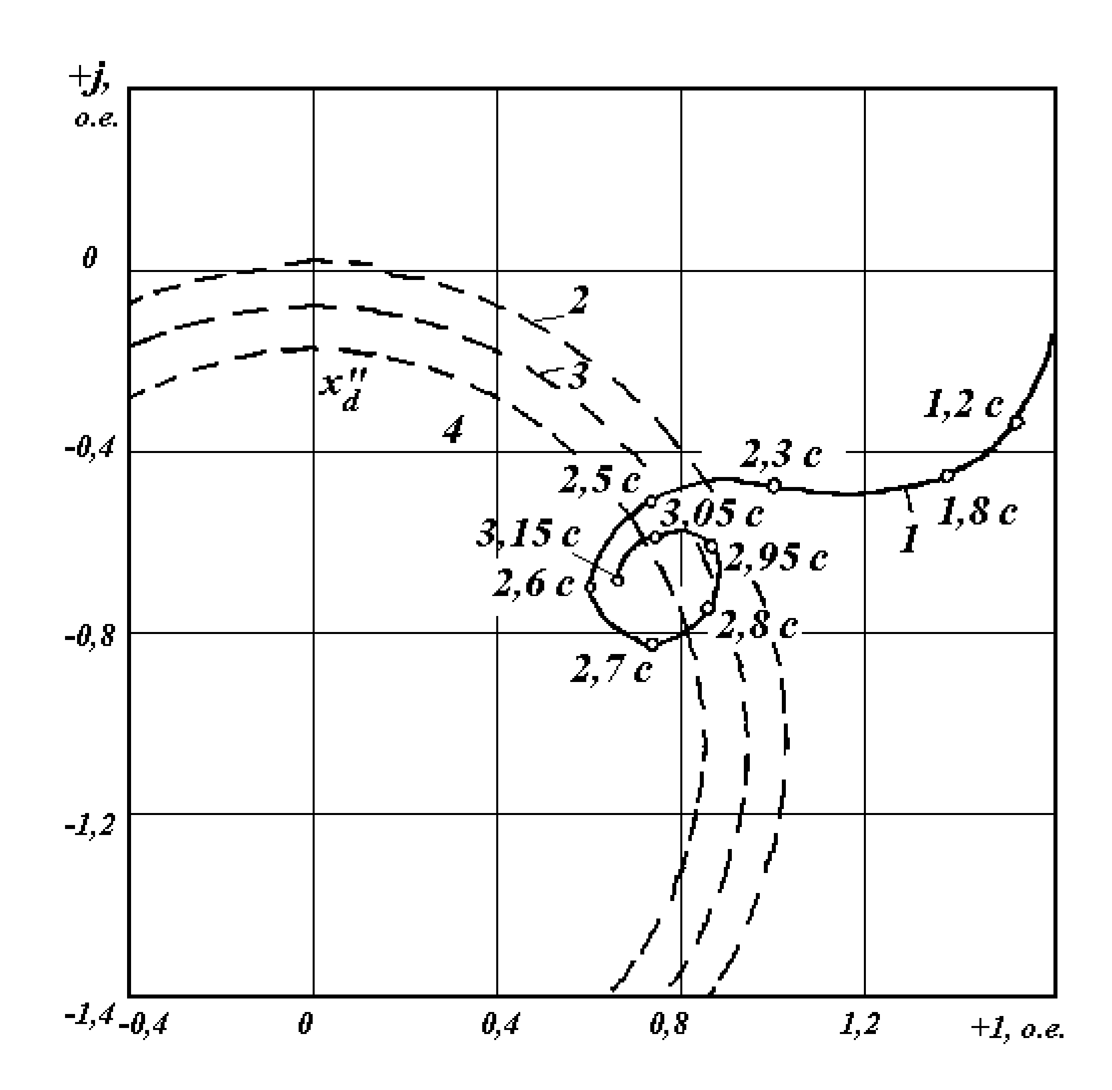


Рис. 4.8. Графики изменения годографа сопротивления по результатам моделирования асинхронного хода при потере возбуждения турбогенератора мощностью 120 МВт при исходных мощностях: $P = P_{н}$, Q =16 МВАр

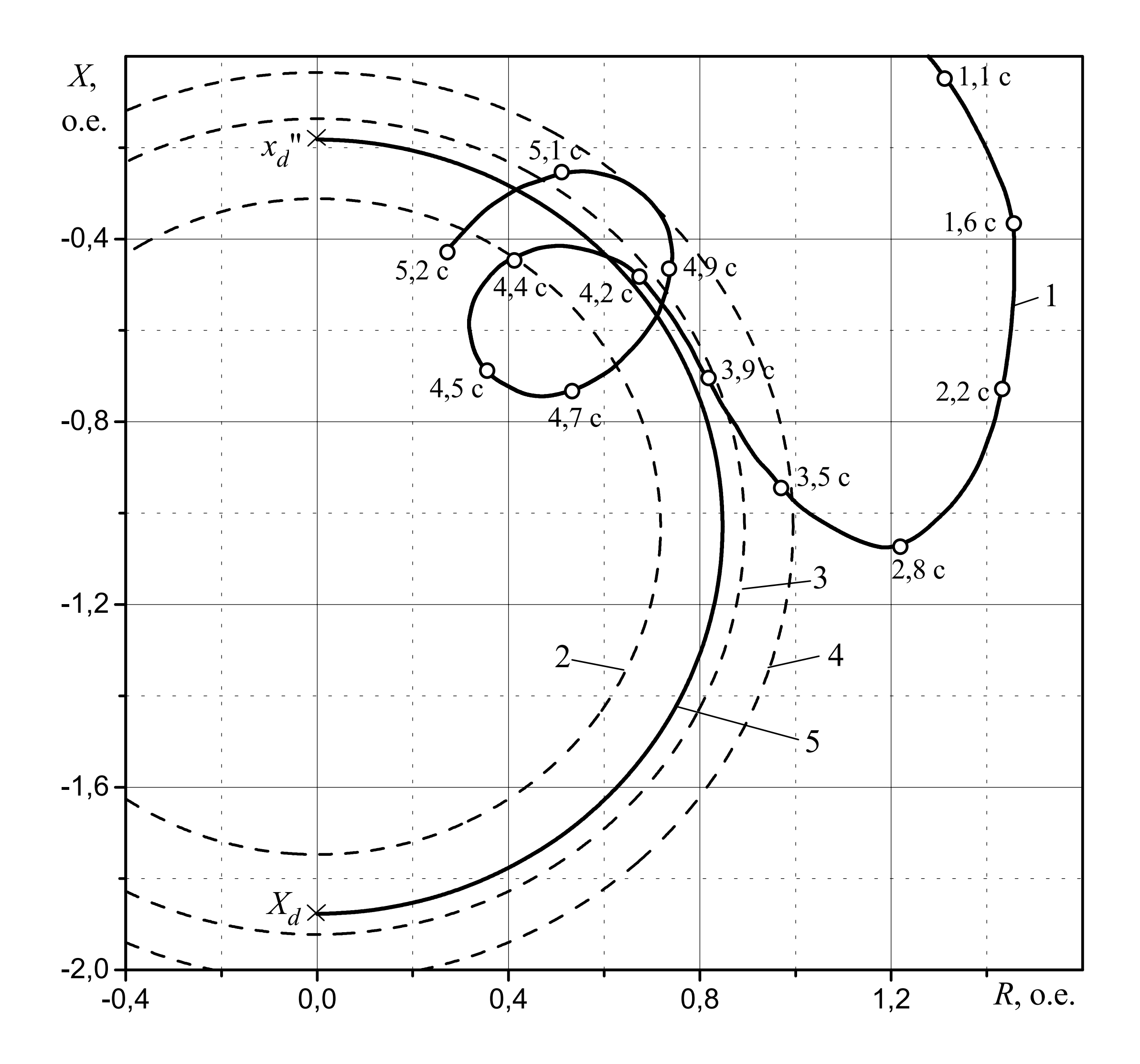


Рис. 4.9. Графики изменения годографа сопротивления по результатам моделирования асинхронного режима при замыкании обмотки возбуждения генератора 120 МВт на сопротивление: P=0,6 $P_н$; Q=15 МВАр

Первая группа режимов характеризуется тем, что измеряемый сигнал двигаясь из области, соответствующей нормальному режиму в область, соответствующую анормальному режиму (кривая 2, рис. 4.10), попадая в пределы уставок (кривая 1), остается там на все время принятия решения. Не дискутируя пока вопрос о выборе зон пуска алгоритмов, отметим лишь, что традиционно они выбираются в виде кривых проходящих на разном расстоянии относительно частотных характеристик генератора. Кривая 2 получена на базе экспериментальных исследований турбогенератора при замыкании обмотки возбуждения накоротко.

Вторая группа режимов отличается тем, что контролируемый сигнал достигнув зоны пуска колеблется относительно граничной линии 1 постепенно втягиваясь в зону пуска. Кривая 3 получена в результате эксперимента при гашении тока в обмотке ротора с помощью АГП.

Третья группа характеризуется сохранением колебательности конролируемого сигнала (кривая 4) относительно граничной линии 1 на все время существования режима. Такое изменение $\dot{Z}(t)$ характерно для случая, когда при замыкании обмотки возбуждения на относительно большое сопротивление сохраняется связь с возбудителем.

Наиболее простым с точки зрения реализации способом является интегральная оценка времени при наличии двух граничных кривых $\dot{Z}_{г1}$ и $\dot{Z}_{г2}$, причем все точки первой из них находятся в зоне ограниченной второй, то есть выполняется условие $\dot{Z}_{г1} \in Z_{г2}$. Алгоритм интегральной оценки на базе двух зон контроля в краткой математической записи определяется зависимостями

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \theta(s_i) q_i + \theta_{n\,пр}(s_n) q_n > \theta_у \,,$$

$$\dot{Z}(t) \in \dot{Z}_{г1} \,,$$

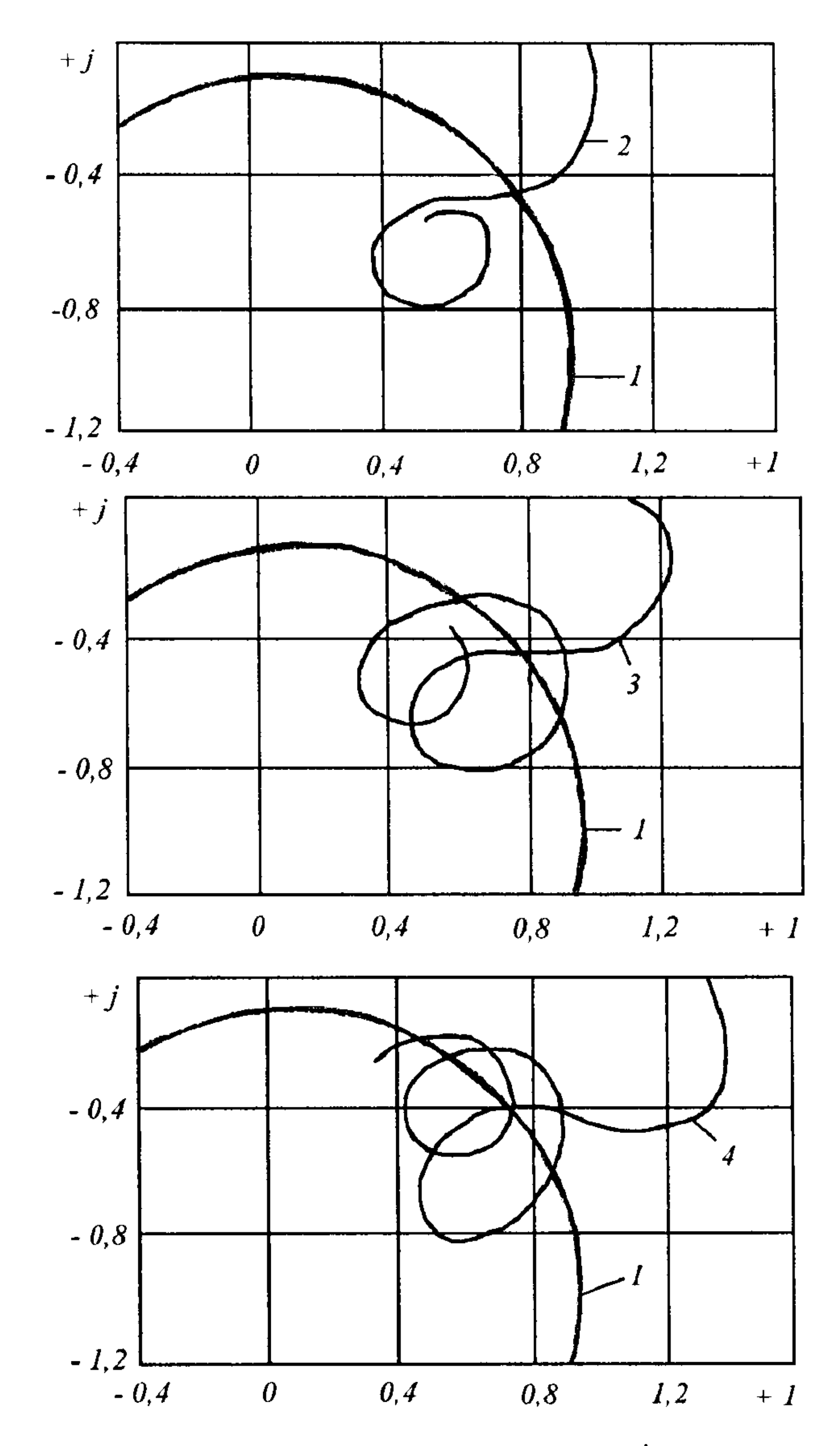


Рис. 4.10. Кривые изменения комплексного сигнала $\dot{Z}(t)$ при анормальном режиме генератора

где

$$q_i = \begin{cases} 1, если\, \dot{Z}(t) \in Z_{г2} \\ 0, если\, \dot{Z}(t) \notin Z_{г2} \end{cases}$$

- двоичная переменная, определяющая обнуление результата суммирования при выходе *Z(t)* за пределы граничной линии;

$$\theta_i(s_i) = t_{iвых} - t_{iвх},\ \dot{Z}(t) \in \dot{Z}_{г1}$$

где θ - время от момента входа $t_{iвх}$ до момента выхода $t_{iвых}$, зависящее от скольжения ротора *S*.

Такой алгоритм обеспечивает выявление анормальных режимов в условиях колебаний в пределах $\dot{Z}_{г1}$ Однако время формирования управляющего воздействия после входа в пределы $\dot{Z}_{г2}$, сильно зависит от скорости изменения контролируемого параметра. Ускорения процедуры выявления можно достигнуть введением адаптивной оценки времени $\theta(s)$ в соответствии с условиями

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \theta(s_i) q_i + \alpha_n \theta_{n\,пр}(s_n) q_n > \theta_у$$

$$\dot{Z}(t) \in \dot{Z}_{г1}$$

где α_i - весовой коэффициент, который увеличивается с каждым циклом попадания в зону пуска, обеспечивая ускоренное интегрирование времени. Организация интегральной оценки при наличии только одной характеристики требует введения специальных операций для запоминания результатов определения времени в предыдущем цикле при превышении времени вне зоны пуска наперед заданного значения:

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \theta(s_i) \beta_i + \theta_{n\,пр}(s_n) \beta_n > \theta_у$$

$$\dot{Z}(t) \in \dot{Z}_{г1}$$

где

$$\beta = \begin{cases} 1, если\ \theta_r > \theta_{ув} \\ 0, если\ \theta_r < \theta_{ув} \end{cases}$$

- двоичная переменная, обнуляющая результаты интегрирования; $\theta_r(s)=t_{rвх}-\ t_{rвых}$ - интервальная оценка времени нахождения за пределами уставок $\dot{Z}_г$ при вторичном попадании в зону пуска.

При больших ускорениях контролируемого параметра временные алгоритмы интегральной оценки оказываются малоэффективными, хотя предотвращают отказ в выявлении. Более быстродействующим является способ дифференциальной оценки времени, основанный на сравнении времени нахождения контролируемого параметра в пределах зоны пуска с временем нахождения за пределами этой зоны:

$$\sum_{i=1}^{n} \theta(s_i) \cdot \theta_r^{-1}(s) q_i > k_y$$

$$\dot{Z}(t) \in \dot{Z}_г$$

где $\theta_i(s)=t_{iвх}-\ t_{iвых}$ - интервальная оценка времени нахождения $\dot{Z}\ (t)$ в пределах зоны пуска; $\theta_r(s)=t_{rвх}-\ t_{rвых}$ - интервальная оценка времени нахождения $\dot{Z}\ (t)$ вне зона пуска;

$$q_i = \begin{cases} 1, если\, \theta_i(S_i) \cdot \theta_r^{-1}(S) > k_y \\ 0, если\, \theta(S_i) \cdot \theta_r^{-1}(S) < k_{y_i} \end{cases}$$

- двоичная переменная, введенная для организации цикличности алгоритма.

Рассмотрим особенности функционирования алгоритмов при возникновении различных дефектов в системе возбуждения. Исследования последствий, возникающих при различных отказах показывают, что при всех

повреждениях связанных с обрывом в цепях возбуждения колебательный характер $\dot{Z}(t)$ связан прежде всего с циркуляцией тока в демпферных контурах или в бочке ротора. Размах колебаний как правило таков, что обеспечивает правильность распознавания двух классов: A_1 – генератор исправен, A_2 – генератор неисправен. Однако при значительных скольжениях ротор генератора успевает провернуться несколько раз, что сопряжено с термическими и динамическими воздействиями на конструктивные узлы и увеличением вероятности потери устойчивости. Введение адаптации с помощью коэффициентов α_i позволяет как показали исследования уменьшить максимальное число проворотов с учетом реальных скольжений до 4 – 5, что безусловно значительно увеличивает быстродействие. Алгоритм дифференциальной оценки в этих условиях не работает, так как $\theta_r(S)=0$ и возникает неопределенностьв принятии решения. Оптимальным при значительных скольжениях является алгоритм основанный на подсчете циклов в сочетании с интегральной оценкой.

В условиях, когда дефект в цепях возбуждения связан с замыканием обмотки накоротко, характеризуется тем, что размах колебаний $\dot{Z}(t)$ по сравнению с предыдущим случаем увеличен. Увеличение размаха связано с наведением тока не только в демпферных контурах или в массиве ротора, но и в короткозамкнутой обмотке возбуждения, причем доля тока в роторе наведенная в обмотке составляет 70 – 80 % от суммарного тока. Реакция алгоритмов зависит от скорости затухания вынужденной составляющей тока и от скорости нарастания наведенных токов. При быстром наборе скольжения возможен отказ алгоритма интегральной оценки, но при этом надежно работает алгоритм дифференциальной оценки.

Замыкание обмотки возбуждения на сопротивление сопровождается дальнейшим ростом размаха колебаний. Это определяется следующими составляющими тока: затуханием тока возбуждения, ростом наведенных токов в обмотке возбуждения, демпферных контурах и теле ротора. Начальный этап процесса связан, прежде всего с затуханием тока возбуждения, причем чем больше сопротивление, тем медленнее затухает

ток. В этих условиях на первом этапе размах колебаний достигает значительных величин. Когда алгоритм интегральной оценки неработоспособен. Но метод дифференциальной оценки по существу обеспечивает распознавание в пределах одного проворота. В дальнейшем наведенная составляющая тока начинает превалировать над уменьшающейся составляющей тока возбуждения, что приводит к уменьшению размаха колебаний, причем алгоритм дифференциальной оценки оказывается неработоспособным. Значительно сложнее процессы в условиях, когда сохраняется связь с возбудителем. По мере эскалации анормального режима размах колебаний не только не уменьшается, а может значительно возрасти. В таких условиях единственным алгоритмом является дифференциальная оценка временных интервалов.

Проведенный анализ показывает, что контроль только одного из рассмотренных признаков потери возбуждения приводит либо к значительному увеличению времени выявления анормального режима, что сопряжено со значительными последствиями для конструктивных элементов генератора, либо к быстродействующему выявлению с ущербом для селективности. Так данные по работе противоаварийной автоматики электрических станций показывают, что использование алгоритмов с пуском по факту попадания в область частотных характеристик генератора и введением выдержки времени от 0,5 до 2,0 секунд приводит к увеличению времени выявления достигающему 10 секунд.

За это время частота вращения генератора может достигнуть уровня устаки автомата безопасности турбины, что приводит к распространению аварийной ситуации на тепломеханическое оборудование. Большие времена отключения генератора также опасны для возникновения и развития дефекта в результате градиента температур в конструктивных элементах ротора и статора, а также в результате термического разрушения изоляции. Необходимо отметить, что указанный вывод был подтвержден в результате экспериментальных исследований.

Организация автоматизированных систем управления требует большего числа классов адекватных числу управляющих воздействий

A_1 – отключить генератор;

A_2 – уменьшить мощность на валу турбины на 20 %;

A_3 – уменьшить мощность на валу турбины на 40 %;

A_4 – уменьшить мощность на валу турбины на 60 %;

A_5 – переключить собственные нужды на пуско-резервный трансформатор.

Распознавание большого числа состояний требует внедрения и более сложных алгоритмов.

Следующая группа способов распознавания включает в себя позиционные алгоритмы. В качестве признаков используются следующие контролируемые величины:

– расстояния текущих значений $\dot{Z}(t)$ от определенных точек (позиций) $\dot{Z}_i$ наблюдения $\left|\dot{Z}(t)-\dot{Z}_i\right|=R_i$;

– фазы изображения процесса на комплексной плоскости относительно позиций $arg\left[\dot{Z}(t)-\dot{Z}_i\right]=\varphi$;

– соотношение приведенных признаков, измеренных относительно различных точек. Рассмотрим в качестве примера двухпозиционные способы распознавания.

Первый из них основан на измерении расстояний комплексного сигнала, изображенного на плоскости, до позиций $\dot{Z}_1$ и $\dot{Z}_2$.

$$R=\frac{R_{Z_1}}{R_{Z_2}}>R_y,\ t\in\{t_1,\ t_2\},\text{ где}$$

$$R_{Z_1}=\sum_{k=1}^{n}\left|\dot{Z}_1-\dot{Z}_k(t)\right|\cdot n^{-1};$$

$$R_{Z_2}=\sum_{k=1}^{n}\left|\dot{Z}_2-\dot{Z}_k(t)\right|\cdot n^{-1}$$

n – число точек, в которых осуществляется замер, $\dot{Z}_k(t)$ – k-ая точка $\dot{Z}(t)$, в которой осуществляется определение расстояния $|\dot{Z}_1 - \dot{Z}_k(t)|$.

Сравнивая процессы при потере возбуждения (рис. 4.11, а) и при асинхронном ходе возбужденного генератора (рис. 4.11, б), легко убедиться, что всегда выполняется соотношение

$$R_{ПВ} >> R_{АХ}$$

То есть имеется высокая различимость состояний генератора по признаку R.

Аналогичным образом в качестве признака можно использовать изменение фаз

$$R = \frac{\Delta arg\left[\dot{Z}_1 - \dot{Z}(t)\right]}{\Delta arg\left[\dot{Z}_2 - \dot{Z}(t)\right]}, \quad t \in \left\{t_1, t_2\right\}$$

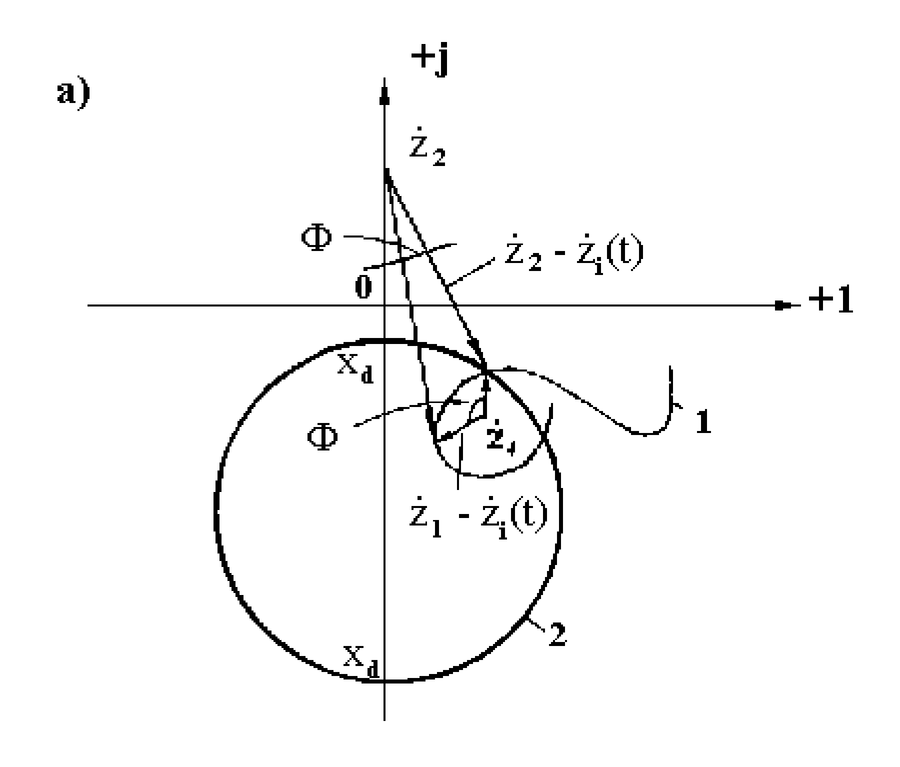
где $\left\{t_1, t_2\right\}$ – интервал, в пределах которого осуществляется определение R.

Применительно к приведенным на рисунках процессам результат $R_{ПВ}>>R_{АХ}$ сохраняется и в варианте замера, полученного согласно последнему выражению.

Вторая группа способов распознавания основана на сравнении текущего состояния с эталонами, соответствующими анормальным режимам.

Для классификации M состояний генератора анормальные режимы задаются M эталонами в виде дискретных значений $\dot{Z}^{Э}_{r1}, \dot{Z}^{Э}_{r2}, ..., \dot{Z}^{Э}_{rj}, ... \dot{Z}^{Э}_{rn}$, где $r = 1, 2, \ldots$ – номер анормального режима.

Координаты каждой точки могут задаваться разными способами, однако, наиболее приемлемым является задание этих точек модулями сопротивлений, отмеренных от начала координат при фиксированных углах $\varphi_1, \varphi_2, \ldots \varphi_N$. На рис. 4.12 представлено разбиение плоскости на 16 секторов



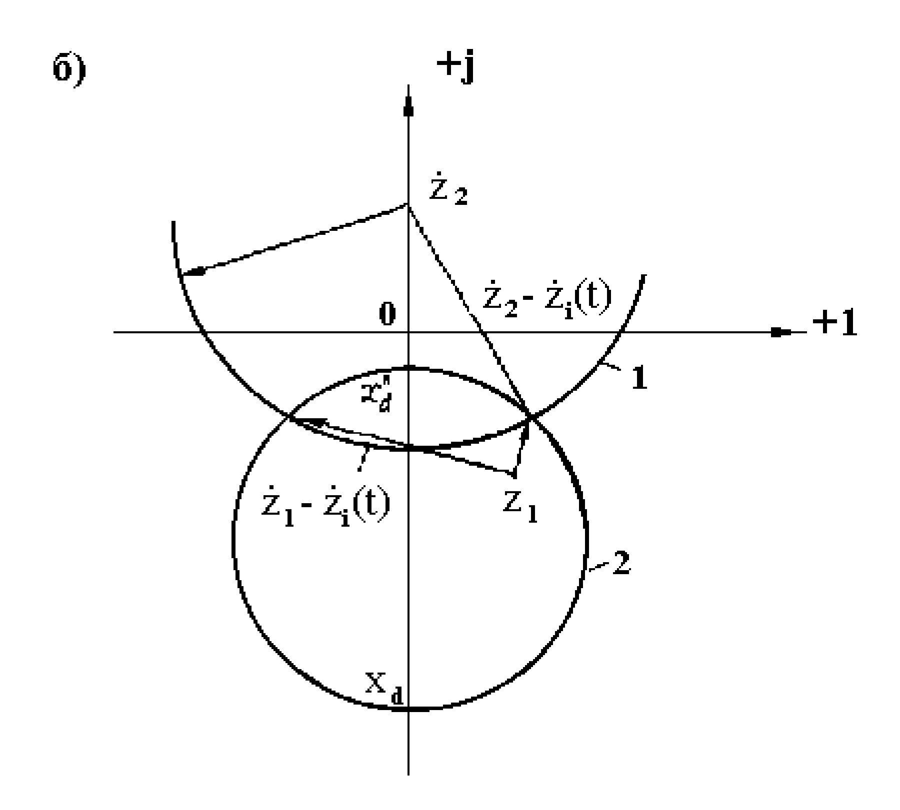


Рис. 4.11. Иллюстрация алгоритма позиционного выявления анормального режима генератора

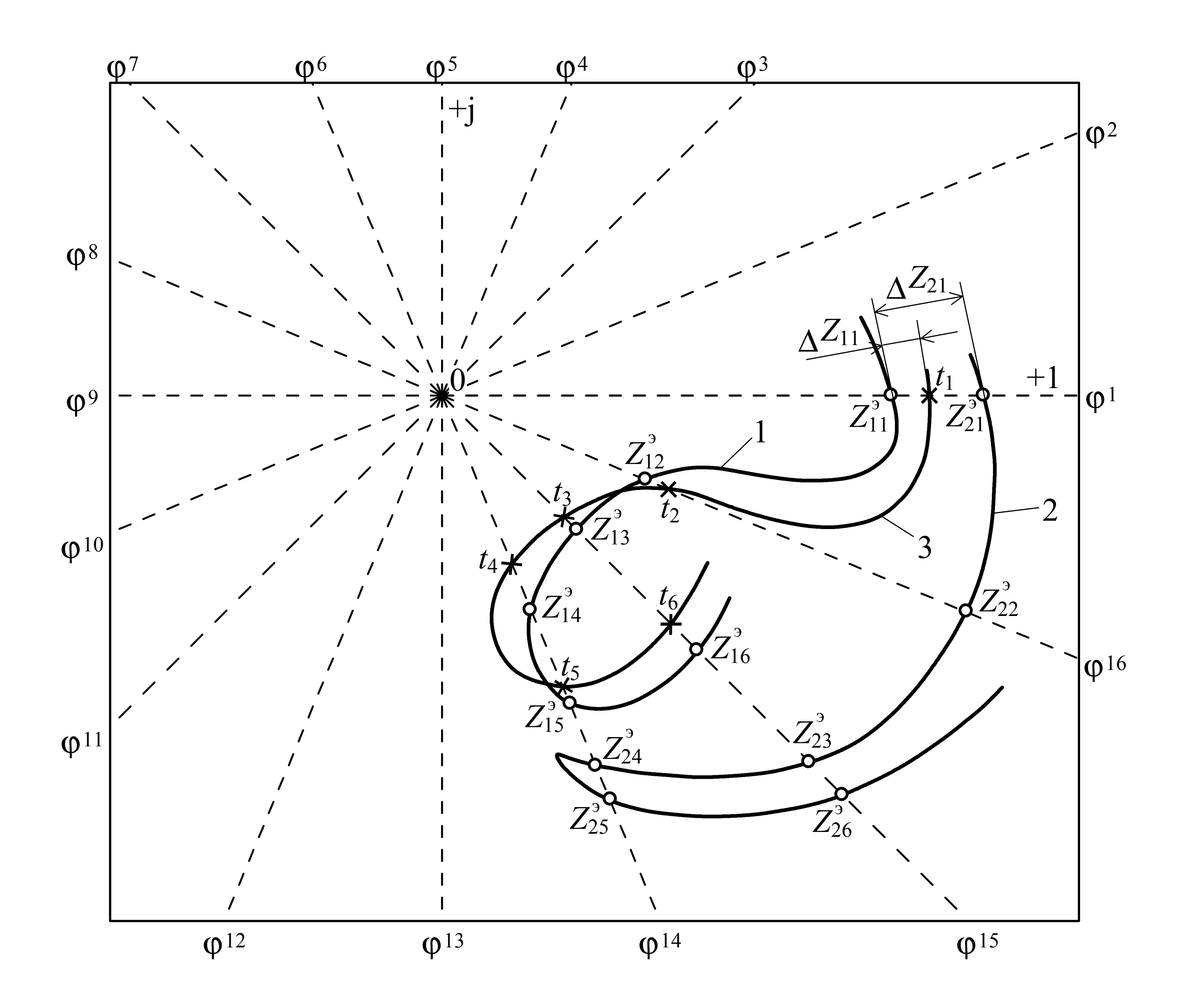


Рис. 4.12. Пример распознавания анормальных режимов

прямыми, исходящими из начала координат под углами $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_{16}$ и обозначенными $o\varphi_1, o\varphi_2, \ldots, o\varphi_{16}$. Текущие значения Z_j находятся в моменты пересечения с прямыми $o\varphi_j$, то есть при фиксированных углах между током и

напряжением. Расстояния ΔZ_{rj} в этом случае находятся как разность между эталонными и текущими значениями сопротивлений, находящимися на лучах $o\varphi_j$.

В качестве примера на рис. 4.12. представлены два эталона режима потери возбуждения и качаний при недовозбуждении: $\left(Z_{11}^{Э}, Z_{12}^{Э}, Z_{13}^{Э}, Z_{14}^{Э}, Z_{15}^{Э}, Z_{16}^{Э}\right), \left(Z_{21}^{Э}, Z_{22}^{Э}, Z_{23}^{Э}, Z_{24}^{Э}, Z_{25}^{Э}, Z_{26}^{Э}\right)$.

Координаты эталонов, заданных в относительных единицах имеют следующие значения: $\left(Z_{11}^{Э}=1{,}5; Z_{12}^{Э}=0{,}6; Z_{13}^{Э}=0{,}55; Z_{14}^{Э}=0{,}6; Z_{15}^{Э}=1{,}1; Z_{16}^{Э}=1{,}1\right)$, $\left(Z_{21}^{Э}=1{,}8; Z_{22}^{Э}=1{,}9; Z_{23}^{Э}=1{,}7; Z_{24}^{Э}=1{,}2; Z_{25}^{Э}=1{,}5; Z_{26}^{Э}=1{,}9\right)$. Степень близости текущих значений к эталонам определяется расстояниями: $\Delta Z_{11} = 0{,}2$; $\Delta Z_{12} = 0$; $\Delta Z_{13} = 0{,}05$; $\Delta Z_{14} = 0{,}1$; $\Delta Z_{15} = 0{,}2$; $\Delta Z_{16} = 0{,}1$; $Z_{21} = 0{,}3$; $Z_{22} = 1{,}3$; $\Delta Z_{23} = 1{,}3$; $\Delta Z_{24} = 0{,}7$; $\Delta Z_{25} = 0{,}6$; $\Delta Z_{26} = 0{,}8$.

Критерием может быть показатель

$$\delta_r = \sqrt{\sum \Delta Z_{jr}^{2} \cdot n^{-1}}.$$

Вычисленные согласно формуле значения критериев соответственно равны: $\delta_1 = 0{,}053$; $\delta_2 = 0{,}37$. Согласно указанному критерию текущее состояние должно быть отнесено к асинхронному ходу при потере возбуждения.

Характерным для последнего алгоритма является последовательное измерение параметров ΔZ_{jr} и при этом на определенном этапе необходима остановка. рациональное соотношение между ложными распознаваниями и числом измерений признаков можно получить, осуществляя измерение последовательно, заканчивая этот последовательный процесс, когда достигнута необходимая точность классификации.

Покажем последовательную процедуру при распознавании двух анормальных состояний. На j-м шаге последовательного процесса, то есть

после измерения j-го признака определяется последовательное отношение вероятностей

$$\lambda_j = \frac{P_j(X/\text{ш}_1)}{P_j(X/\text{ш}_2)},$$

где $P_j(X/\omega_i)$ – функция условной плотности вероятности X для класса ω_i. Полученное отношение сравнивается с двумя границами А и В. Решение о том, что текущий результат замера можно отнести к классу ω_1, принимается, если $\lambda_j \geq A$, что текущий результат замера можно отнести к классу ω_2, принимается, если $\lambda_j \leq B$. По существу такая классификация определяет три области: область относящуюся к ω_1; область, относящуюся к ω_2; область между двумя границами. Третья область соответствует условиям, когда не может быть принято окончательное решение при последовательном процессе классификации решающие границы изменяются с числом замеров признаков n. Предположим, например, что x_1, x_2, … – независимые замеры признаков с одномерной Гауссовой функцией плотности $p(x_j/\omega_i)$, j=1, 2 …, i=1, 2, со средним значением m_i и дисперсией σ^2. Для простоты вычислим $\log\lambda_n$ вместо λ_n. После того как выполнено первое измерение x_1, получим

$$\log \text{л}_1 = \log \frac{p(x_1/\text{ш}_1)}{p(x_1/\text{ш}_2)} = \log \frac{\left(y\sqrt{2p}\right)^{-1} \exp\left[-\left(2y^2\right)^{-1}(x_1 - m_1)^2\right]}{\left(y\sqrt{2p}\right)^{-1} \exp\left[-\left(2y^2\right)^{1}(x_1 - m_2)^2\right]} =$$

$$= \frac{1}{y^2}\left[(m_1 - m_2)x_1 - \frac{1}{2}\left(m_1^2 - m_2^2\right)\right]. \qquad (4.11)$$

Сравним $\log\lambda_1$ с log A и log B.

Если

$$x_1 \geq \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log A + \frac{1}{2}(m_1 + m_2),\ \text{то}\ x_1 \sim \omega_1, \qquad (4.12)$$

если

$$x_1 \le \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log B + \frac{1}{2}(m_1 + m_2), \text{ то } x_1\sim\omega_2, \qquad (4.13)$$

и если

$$\frac{y^2}{m_1 - m_2}\log B + \frac{1}{2}(m_1 + m_2) < x_1 < \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log A + \frac{1}{2}(m_1 + m_2),$$

то следует взять x_2, т.е. перейти ко второму шагу процесса. После второго измерения признаков

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

и

$$\log \text{л}_2 = \log\frac{p(x_1 / \text{щ}_1)}{p(x_1 / \text{щ}_2)} + \log\frac{p(x_2 / \text{щ}_1)}{p(x_2 / \text{щ}_2)} = \frac{m_1 - m_2}{\sigma^2}\left[x_1 + x_2 - (m_1 + m_2)\right]. \qquad (4.14)$$

По-прежнему, если

$$x_1 + x_2 \ge \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log A + (m_1 + m_2), \text{ то } X\sim\omega_1, \qquad (4.15)$$

если

$$x_1 + x_2 \le \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log B + (m_1 + m_2), \text{ то } X\sim\omega_2, \qquad (4.16)$$

и если

$$\frac{y^2}{m_1 - m_2}\log B + (m_1 + m_2) < x_1 + x_2 < \frac{y^2}{m_1 - m_2}\log A + (m_1 + m_2),$$

то берется x_3 и процесс переходит к третьему шагу. На n-м шаге процесса

$$\log \text{л}_n = \sum_{i=1}^{n} \log \frac{p(x_2 / \text{ш}_1)}{p(x_2 / \text{ш}_2)} = \frac{m_1 - m_2}{\sigma^2} \sum_{i=1}^{n} \left[x_i - \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \right]. \qquad (4.17)$$

Теперь процедура классификации будет следующей:

если

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \geq \frac{y^2}{m_1 - m_2} \log A + \frac{n}{2}(m_1 + m_2), \; X \sim \omega_1, \qquad (4.18)$$

если

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \leq \frac{y^2}{m_1 - m_2} \log B + \frac{n}{2}(m_1 + m_2), \text{ то } X \sim \omega_2, \qquad (4.19)$$

и если

$$\frac{y^2}{m_1 - m_2} \log B + \frac{n}{2}(m_1 + m_2) < \sum_{i=1}^{n} x_i < \frac{y^2}{m_1 - m_2} \log A + \frac{n}{2}(m_1 + m_2),$$

то берется x_{n+1}. Следует отметить, что решающие границы, определяемые формулами (4.18) и (4.19) при знаках равенства, представляют собой две параллельные гиперплоскости в пространстве признаков. Заметим далее, что расстояние между границами (ширина области неопределенности)

$$\frac{y^2}{m_1 - m_2} \log A - \frac{y^2}{m_1 - m_2} \log B = \frac{y^2}{m_1 - m_2} \log \frac{A}{B}, \qquad (4.20)$$

т.е. пропорционально $\sigma^2/(m_1 - m_2)$. При данных вероятностях ошибок e_{12} и e_{21} среднее число измерений, необходимых для завершения процесса, пропорционально σ^2 и обратно пропорционально $(m_1 - m_2)$.

При числе классов, большем двух, $m>2$, может быть применен обобщенный последовательный критерий отношения вероятностей [5]. На n-м шаге обобщенное последовательное отношение вероятностей для каждого класса вычисляется следующим образом:

$$U_n\left(X/\omega_i\right)=\frac{p_n\left(X/\omega_i\right)}{\left[\prod_{q=1}^{m}\left(1-e_{iq}\right)\right]^{1/m}},\ i=1,\ 2,\ \ldots,\ m. \qquad (4.21)$$

Далее величина $U_n(X/\omega_i)$ сравнивается с останавливающей границей для i-го класса образов $A(\omega_i)$, и процедура решения состоит в исключении класса образов ω_i из дальнейшего рассмотрения, т.е. считается, что X не принадлежит классу ω_i, если

$$U_n(X/\omega_i)< A(\omega_i),\ i=1,\ 2,\ \ldots,\ m. \qquad (4.22)$$

Останавливающая граница определяется соотношением

$$A\left(\omega_i\right)=\frac{1-e_{ii}}{\left[\prod_{q=1}^{m}\left(1-e_{iq}\right)\right]^{1/m}},\ i=1,\ 2,\ \ldots,\ m. \qquad (4.23)$$

После исключения класса образов ω_i из рассмотрения общее число классов образов уменьшается на единицу и составляется новое множество обобщенных последовательных отношений вероятностей. Классы образов последовательно исключаются до тех пор, пока не останется один класс, который и принимается как опознанный класс.

Описанный критерий исключения, хотя и является несколько осторожным, обычно приводит к высокому проценту правильных распознаваний благодаря тому, что исключаются лишь те классы образов, принадлежность к которым наиболее сомнительна.

4.3. Выявление дефектов коммутационных аппаратов.

К числу анормальных состояний вакуумных выключателей относятся увеличение переходного сопротивления контактов и разгерметизация камер.

Изменения контактных сопротивлений достаточно тесно связана с особенностями разряда в вакууме, уточненные процессы, в котором применительно к коммутационным аппаратам изложены в главе 1. Экспериментальные исследования и длительные наблюдения показывают, что переходное сопротивление может увеличиваться в процессе эксплуатации свыше допустимого значения. На рис. 4.20 представлен характер изменения переходного сопротивления находящегося в эксплуатации двух выключателей.

Возникают следующие вопросы, ответ на которые во многом определяет успешность эксплуатации выключателей: почему не при каждой коммутации происходит увеличение переходного сопротивления, какие шаги целесообразно предпринять для снижения вероятности возникновения дефекта в контактной системе, каким образом в камере с значительным дефектом контактов вернуть переходное сопротивление в пределы нормы, каким способом выявить возникновение дефектов в контактной системе под напряжением.

С помощью специализированной установки был проведен эксперимент для определения состояния контактной системы. На базе проведенных исследований получены зависимости вероятности увеличения переходного сопротивления от интервала времени от момента размыкания контактов до момента прохождения тока через ноль (рис. 4.21). Кривая 1 получена для дугогасительной камеры КДВ 2-10-5/400, кривая 2 – для дугогасительной камеры КДВКЗ-10-20/1600.

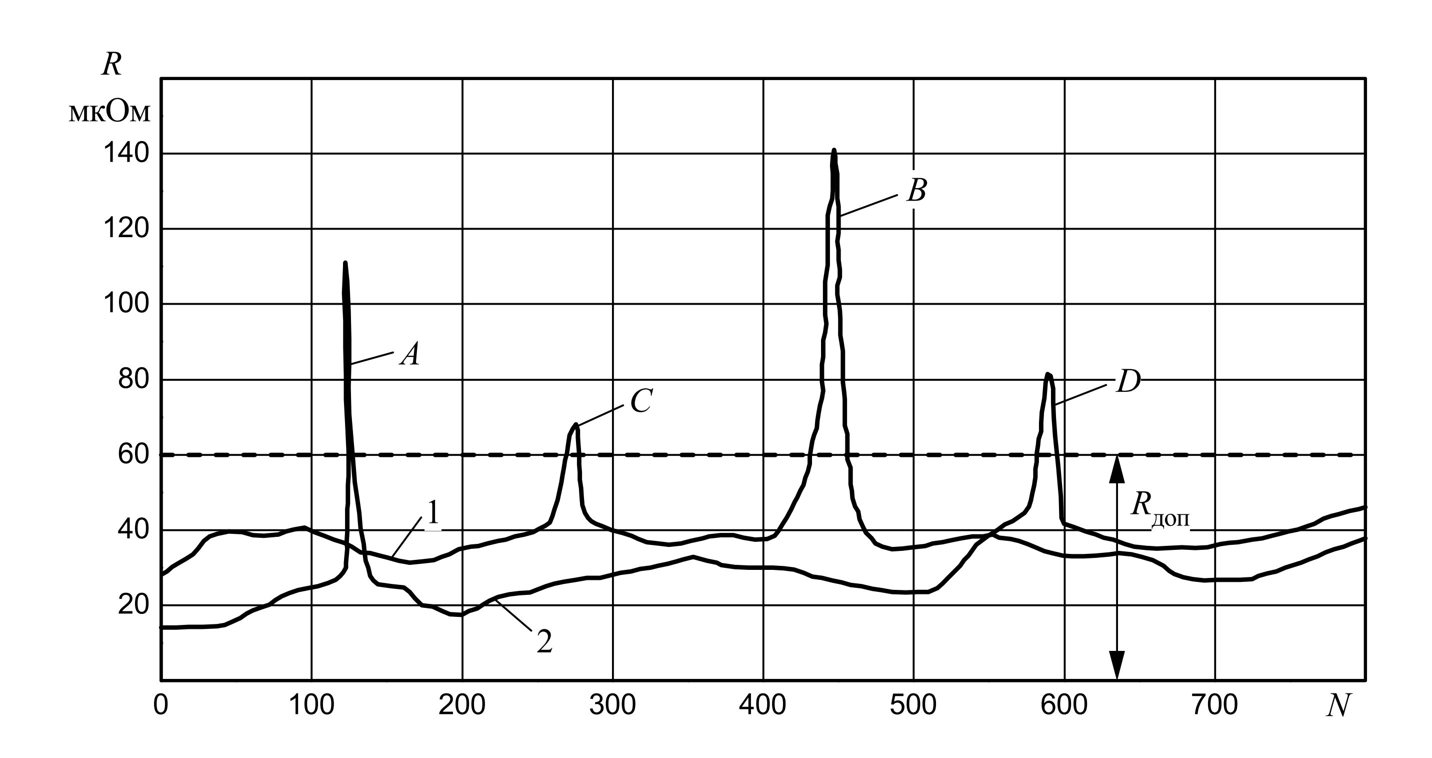


Рис. 4.20. Изменение переходного сопротивления вакуумной камеры в процессе эксплуатации

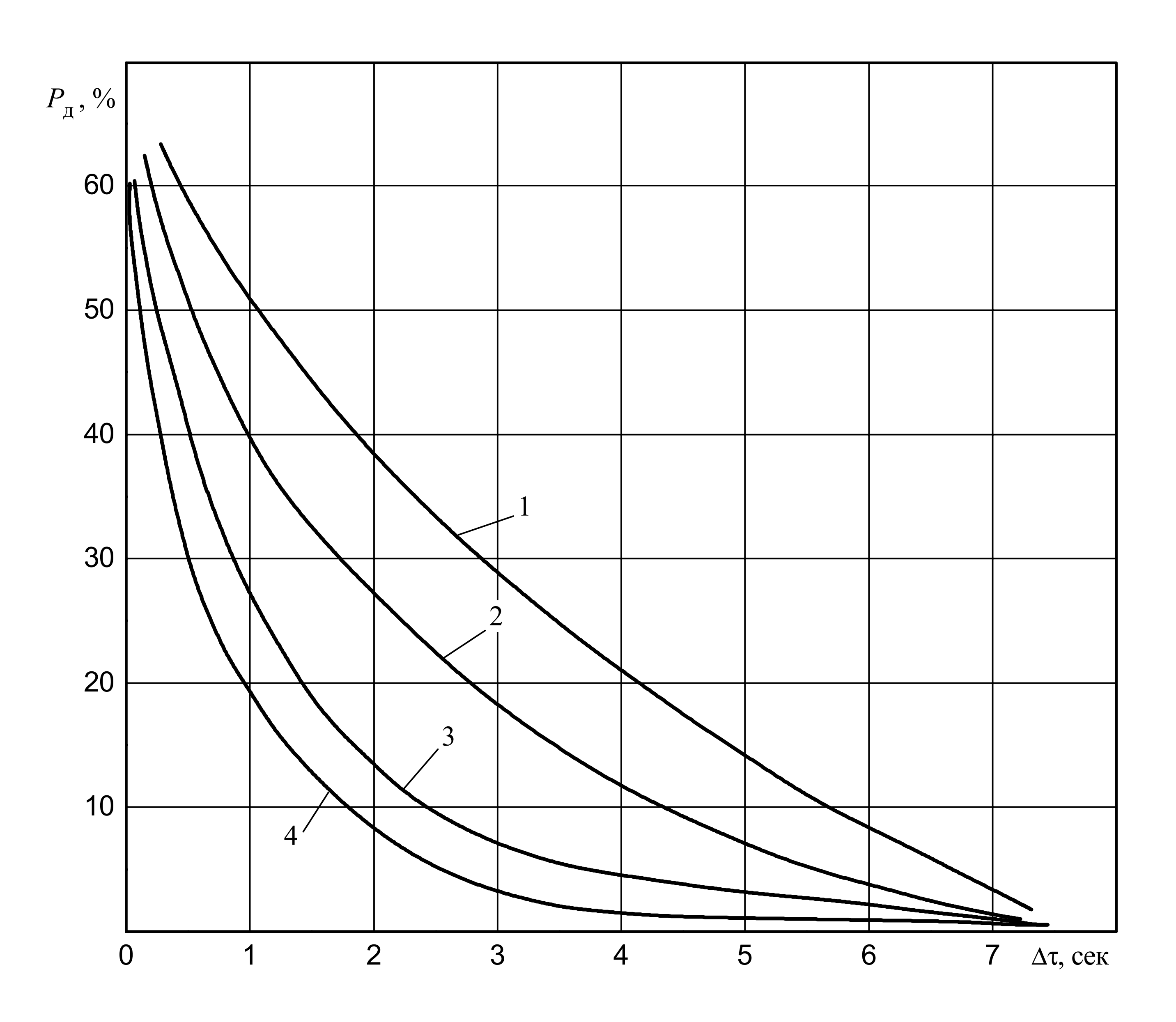
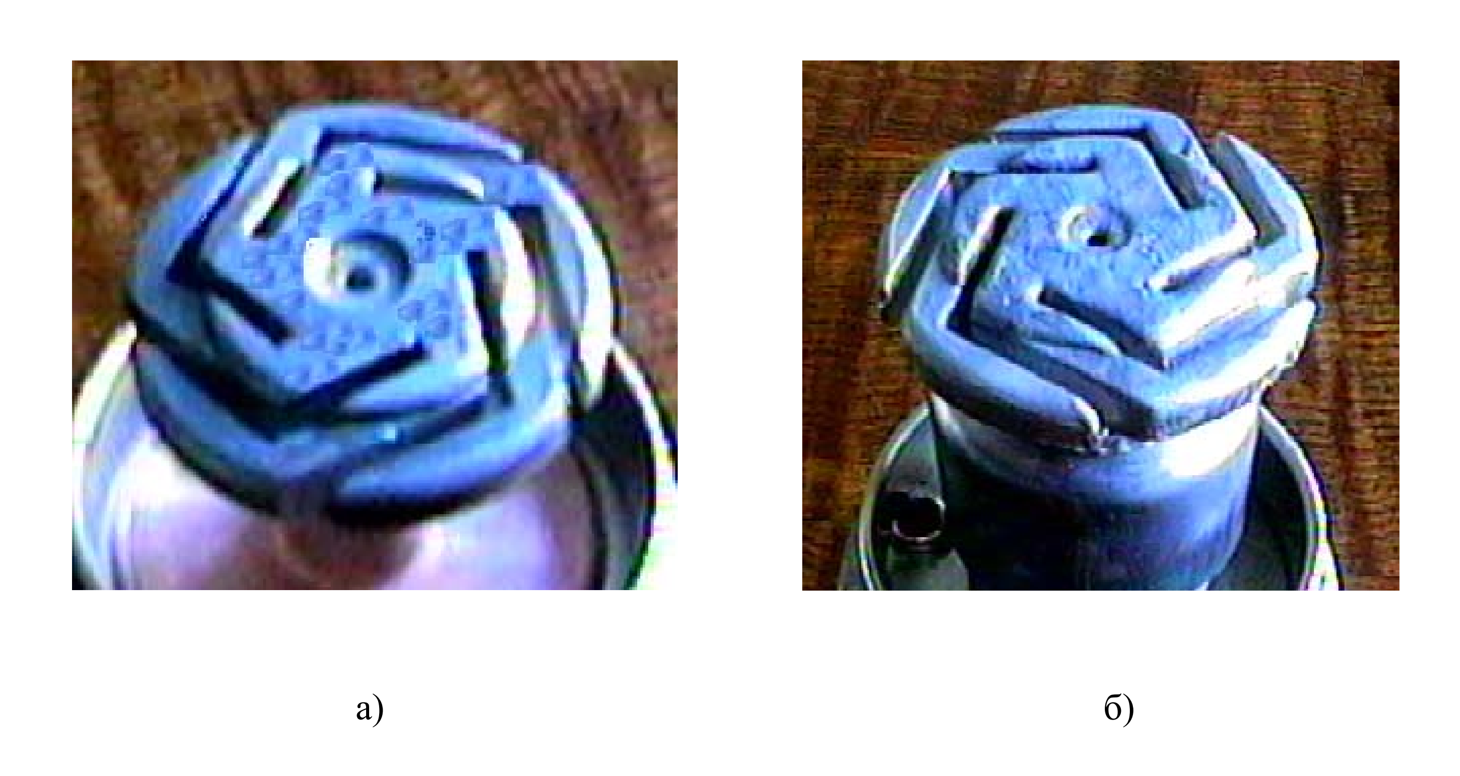


Рис. 4.21. Зависимость вероятности возникновения переходного сопротивления сверх допустимого в зависимости от момента времени размыкания контактов

Физика процессов, которые являются причиной увеличения переходного сопротивления, связана с автоэлектронной эмиссией. Так, при расхождении контактов в непосредственной близости от момента прохождения тока через ноль составляющие термоэлектронной, фотоэлектронной и вторичной эмиссией не успевают достигнуть значительных величин. В связи с этим энергетическая составляющая, поддерживающая разряд в камере определяется током. В этих условиях энергетический запас, удерживающий температуру места опоры элементарного разряда, мал. Прежде чем происходит выравнивание поверхности контакта, материал в стволе разряда переходит в твердую фазу, оставляя микронеровность, что и приводит к увеличению переходного сопротивления. В главе 1 это продемонстрировано на рис. 4.22, б, где показаны изменения поверхности контактов в процессе эксплуатации.

При коммутациях значительных токов короткого замечания возникают видимые разрушения контактной системы. Так на рис. 4.22, а показан вид поверхности контактов при отключении тока 8 кА вакуумной камерой КДВК-10-10/630. Обследования выключателей, результаты которых отражены в частности на рис. 4.20 показывают, что величина переходного сопротивления зависит от величины тока. Так, пики A и B на кривых 2 и 1 получены при токах соответственно 4 кА и 6 кА, а пики *C* и *D* при токах 0,3 кА и 0,4 кА.

Единственным реальным способом устранения дефекта является внешнее воздействие на неразборную и неремонтируемую вакуумную камеру. Комплекс экспериментальных исследований проведенных в лаборатории Санкт-Петербургского государственного технического университета и Петербургского энергетического института повышения квалификации, позволил получить количественные характеристики для коммутационных воздействий на контакты.



а) б)

Рис. 4.22. Изменения поверхности контактов при отключении токов короткого замыкания

Соотношение минимального тока $I_{т.мин}$ и числа циклов коммутаций $n_ц$ для устранения дефекта контактов демонстрируется кривой 2 (рис. 4.25). Устранение дефекта достигается переносом металла с микронеровности на противоположный электрод в процессе коммутации.

Микронеровности при разрыве токов меньше номинальных возникают в результате воздействия перенапряжений после разрыва контактов.

В условиях импульсных перенапряжений наблюдается явление взрывной эмиссии. Она происходит при больших плотностях тока с микровыступов. Через некоторое время t после начала эмиссии происходят микровзрывы острий на катоде, при этом образуются плазменные сгустки – катодные факелы, расширяющиеся со скоростью порядка 10^4 м/с, а плотность тока быстро нарастает. С ростом напряженности электрического поля $t_з$ уменьшается обратно пропорционально квадрату плотности тока

$$t_з = 4 \cdot 10^9 / j^2 A,$$

где j_A – в А/см^2, $t_з$ – в $с$.

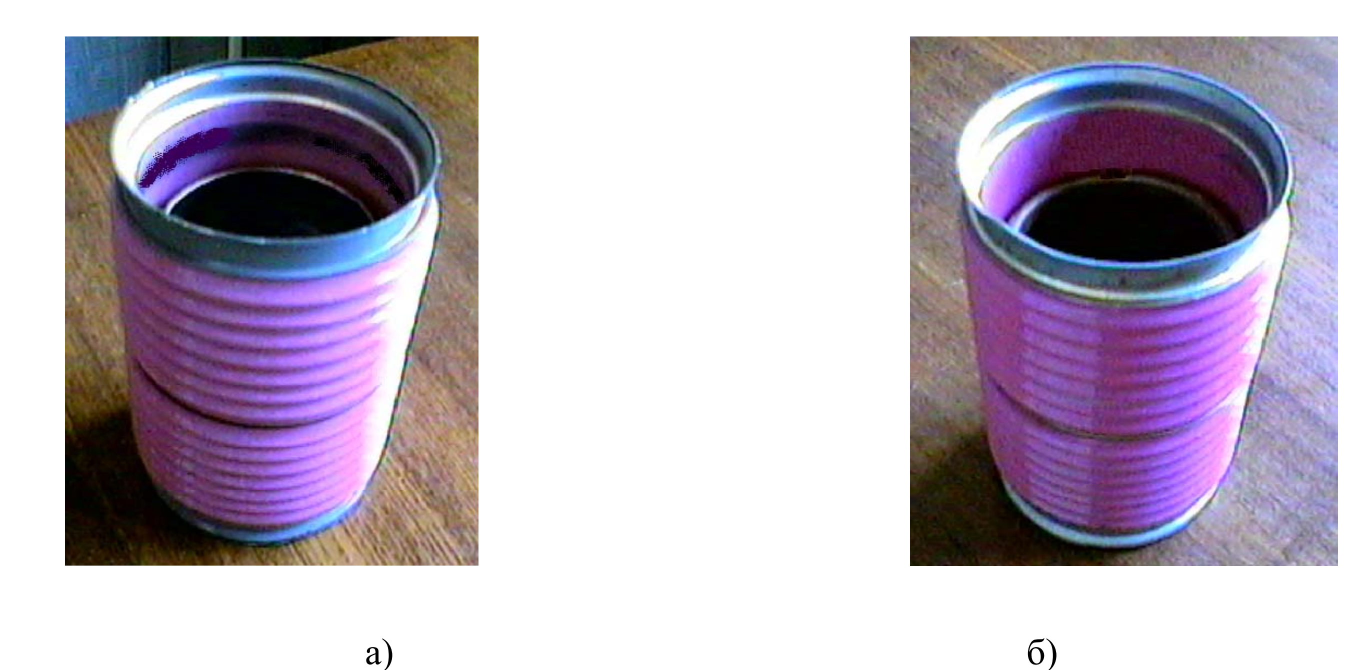
Быстрый рост плотности тока обусловлен термоэлектронной эмиссией из плазменного катодного факела. Еще до достижения катодным факелом анода навстречу ему начинает двигаться анодный факел, образующийся в результате бомбардировки анода ускоренными электронами. Длительность импульса тока взрывной эмиссии $t_{вэ}$ определяется в основном временем перекрытия промежутка катодным факелом: $t_{вэ}$=d/ν, где d – расстояние между электродами, ν – скорость распространения катодного факела. Разряд в результате взрывной эмиссии опасен, прежде всего, тем, что большой объем переносимого металла при недостаточной энергии дает на поверхности контактной системы значительные неровности, приводящие к увеличению контактного сопротивления больше допустимого. Однако, как правило, высота микронеровностей при воздействии перенапряжения значительно меньше, чем при отключении токов короткого замыкания.

Устранение дефекта в этих условиях достигается меньшими токами тренинга (кривая 1, рис. 4.25).

Состояние контактной системы на всем промежутке эксплуатации от установки до исчерпания ресурса очень сильно зависит от количества и величин отключаемых токов короткого замыкания. До недавнего времени считалось, что из-за перемены полярности контактов при большом числе коммутаций, эрозионного износа не происходит. Однако обследования более чем 100 вакуумных выключателей разных заводов изготовителей с разборкой камер показывают, что вынос металла из межконтактного промежутка происходит. Подтверждением этому служит внешний вид корпусов новой камеры КДВ 2-10-5/400 (рис. 4.23, б) и камеры после 5010 коммутаций (рис. 4.23, а). Внутренняя поверхность керамической части корпуса чиста в новой камере и имеет явно видный налет в камере побывавшей в эксплуатации.

Вынос осуществляется, как правило, мягких фракций контакта, то есть меди. В результате на поверхность контактов выступают твердые составляющие, например, хром, формируя микронеровности. как правило, это проявляется к концу коммутационного ресурса, но это сильно зависит от количества и величины отключаемого тока короткого замыкания (рис. 4.24). Кривые 1, 2 получены для камер, участвовавших в отключении токов короткого замыкания 6 кА соответственно 10 и 20 раз, а кривая 3 – для тех же камер, участвовавших в отключении токов короткого замыкания 4 кА 40 раз.

Ранее считалось, что эрозионный износ, приводящий к возникновению микронеровностей из-за выхода в поверхностные слои контактов частичек хрома, является необратимым. Исследования показали, что разогрев контактной системы позволяет за счет ударного воздействия сместить частички твердых фракций внутрь электрода. Уровень токов тренинга должен достигать 2500 А при небольших числах коммутаций, а при



а) б)

Рис. 4.23. Вид корпуса вакуумной камеры: а – после 5010 коммутаций; б – до начала эксплуатации

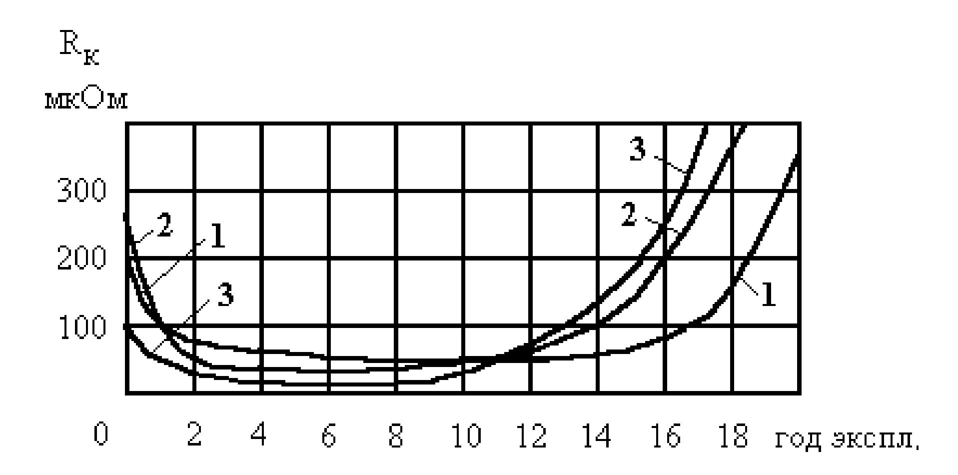


Рис. 4.24. Характер изменения контактных сопротивлений за время эксплуатации

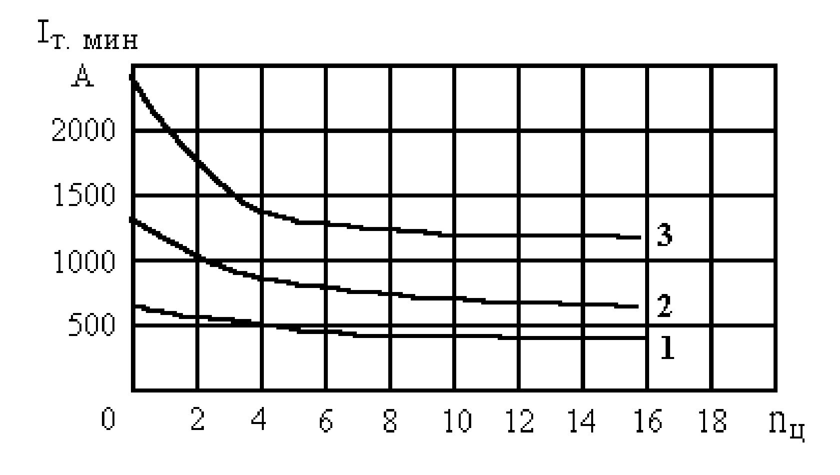


Рис. 4.25. Зависимость тока тренинга от числа коммутаций

увеличении числа циклов не должен спускаться ниже 1250 А (кривая 3, рис. 4.25). Попытка увеличить коммутируемый ток свыше 2500 обеспечивает лучший разогрев контактной системы, но вместе с тем при таких токах скорость потери энергии на финишных этапах разряда велика и велик объем плазменных сгустков, застывающих в виде микронеровностей.

Другим, не менее важным аспектом контроля дугогасительных камер вакуумных выключателей является контроль потери герметичности. процессы, возникающие внутри камеры при потере вакуума отличны от процессов в камерах без дефекта.

Обследования большого числа вакуумных выключателей, находящихся в эксплуатации, показывают, что основными причинами разгерметизации дугогасительных камер являются в основном следующие причины: возникновение дефектов в сильфоне, возникновение микротрещин в местах пайки, нарушения в технологии вакуумирования, дефекты, вносимые при монтаже и наладке.

В таблице 4.1 приведено распределение причин разгерметизации от общего числа отказов камер, причем в числителе указаны цифры для камер, не отработавших коммутационный ресурс с запасом до 1000 коммутаций, в знаменателе – цифры для камер, отработавших ресурс, и камер, у которых остаточный ресурс составляет менее 1000 коммутаций. Из таблицы видно, что для камер с числом коммутаций, близким к ресурсу, наблюдается значительное увеличение отказов из-за возникновения дефектов в сильфоне. Это связано с усталостными явлениями и необратимыми процессами в материале. Рассмотрим процессы, происходящие в вакуумной камере в условиях разгерметизации.

При полной потере вакуума канальный характер разряда сохраняется, причем проходит в стримерной форме. В этих условиях анализ последствий связан с давлением внутри камеры.

Стримерная форма разряда в коротких промежутках завершается, когда стримеры замыкают промежуток. Концентрация электронов в канале в этот момент $n_e \approx 10^{19}$ м$^{-3}$. Можно оценить сопротивление канала $R=\rho \ell_к/S$, где $\ell_к$ – длина канала, S – сечение (порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$), ρ – удельное сопротивление. Частоту столкновений электронов с молекулами газа оценим по формуле $\nu_e=n_0\sigma_c\upsilon_т$, где сечение столкновений σ_c порядка 10^{-19}, тепловая скорость электронов порядка 10^6 м/с (при энергии 2-3 эВ), а концентрация молекул порядка 10^{25} м$^{-3}$. Таким образом, $\nu_e \approx 10^{12}$ c^{-1}, $\rho=\nu_e m_e/n_e e_0^2 \approx 0{,}1$ Ом·м, а сопротивление канала длиной 10^{-2} м имеет порядок $10^4 \div 10^5$ Ом. Если сопротивление цепи много меньше этого значения, то напряжение на промежутке непосредственно после замыкания его стримером близко к начальному. Спад этого напряжения при одновременном росте тока в цепи происходит из-за снижения сопротивления канала вследствие его расширения и роста проводимости плазмы. Первый из этих процессов возможен, если давление в канале достаточно велико, поэтому в начале, пока газ остается холодным, основное значение имеет рост концентрации электронов вследствие продолжающихся ионизационных процессов. Эти процессы достаточно сложны: сначала ионизация распространяется по оси канала в виде волны (ионизационная волна) со скоростью выше 10^8 см/с, затем рост концентрации происходит однородно по длине. Можно принять допущение, что фиксированная доля энергии, выделяемой в плазме, расходуется на ионизацию в газе. Тогда рост n_e описывается уравнением

$$w_и \frac{dn_e}{dt} = bcj^2 = b\frac{m\nu_e j^2}{n_e e_o^2},$$

Таблица 4.1.

Причины разгерметизации камер вакуумных выключателей
в % от общего числа причин

№ п/п	Причины разгерметизации	Класс напряжения, кВ			
		0,4-3	3-10	10-35	35-100
1	Дефекты в сильфоне	$\frac{37,9}{72,3}$	$\frac{35,2}{75,4}$	$\frac{31,4}{80,2}$	$\frac{29,5}{85,4}$
2	Микротрещины в местах пайки	$\frac{56,3}{26,5}$	$\frac{48,9}{23,7}$	$\frac{43,8}{18,6}$	$\frac{39,2}{13,1}$
3	Нарушения в технологии вакуумирования	$\frac{3,8}{0,9}$	$\frac{9,1}{0,5}$	$\frac{10,5}{0,7}$	$\frac{9,8}{0,8}$
4	Дефекты монтажа и наладки	$\frac{2,0}{0,3}$	$\frac{6,8}{0,4}$	$\frac{14,3}{0,5}$	$\frac{21,5}{0,7}$

где j – плотность тока, w_u – работа ионизации молекулы, b – численный коэффициент, характеризующий долю энергии, идущую на ионизацию. В дальнейших расчетах этот коэффициент предполагается постоянным. Уравнение для n_e легко интегрируется

$$n_e^2 = \frac{2bmv_e}{w_u e_o^2}\int_0^t j^2 dt + n_e^2(0),$$

где $n_e(0)$ – начальное значение n_e. Если $n_e >> n_e(0)$, то выражение для сопротивления канала принимает вид:

$$R = \frac{m_e v_e \ell_к}{n_e e_o^2 S_к} = \frac{\ell_к}{\sqrt{\frac{2a}{p}\int_0^t t^2 dt}},$$

где $a = bp\left(e_0^2 w_i m v_e\right)^{-1}$ – эмпирическая постоянная, p – давление газа, $S_к$ – сечение канала.

Данные опытов показывают, что число a не меняется в течение времени порядка 10^{-8} сек. Модель описывает изменение концентрации электронов в диапазоне $10^{21}\div10^{24}$ м$^{-3}$ при плотностях тока выше 10 А/см^2. В воздухе при давлении, близком к атмосферному, $a\div(0,8\div1)$ атм·см^2/(сВ^2), при этом число b достигает порядков 10^{-3}. Отметим, что сопротивление канала, определяемое предполагаемой моделью, не зависит от его сечения, поскольку концентрация электронов, а значит и проводимость плазмы при заданном токе обратно пропорциональны сечению. По мере роста энергии, вкладываемой в канал, все большая ее доля передается от электронов тяжелым частицам, – происходит разогрев газа. При этом температура газа и электронов становятся близки, а концентрация электронов определяется термической ионизацией. Плазма искровых разрядов в азоте и воздухе при нормальном давлении и скорости нарастания тока порядка $10^9\div10^{11}$ А/с имеет температуру несколько десятков тысяч градусов. Проводимость такой

плазмы меняется в сравнительно узких пределах: $1/\rho_v \approx (2 \div 4)\cdot 10^4$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, поэтому основным фактором, определяющим изменение сопротивления канала, является рост его радиуса вследствие гидродинамического расширения. В этой стадии канал ярко светится, его радиус расширяется со скоростью порядка $10^2 \div 10^3$ м/с, при этом в окружающем канал газе генерируется ударная волна, поскольку давление достигает десятков атмосфер, и канал играет роль цилиндрического поршня. Скорость радиуса канала dr_k/dt и давление в нем $p_к$ связаны соотношением

$$k_0 p_м \left(\frac{dr_k}{dt}\right)^2 = p_k \,,$$

где $\rho_м$ – плотность газа вне канала, k_0 – безразмерный численный коэффициент ($k_0 \approx 0{,}9$). Пренебрежем неоднородностью плазмы по радиусу и по оси. Тогда для расчета скорости расширения достаточно использовать уравнение баланса энергии без учета потерь на излучение:

$$\frac{ic_v}{pr_k^2} = \frac{d}{dt}\left(pr_k^2 \frac{s}{2} nkT\right) + p_k \frac{d}{dt}\left(pr_k^2\right).$$

Здесь первый член справа есть скорость изменения энергии теплового движения (s –эффективное число степеней свободы частицы), второй член – это мощность, расходуемая на расширение. Выражение в левой части – мощность, вкладываемая в канал единичной длины радиуса $r_к$. В уравнении баланса энергии $p_к$ – давление, $n_к$ – концентрация частиц в канале. В основном это нейтральные частицы, так как степень ионизации невелика (до нескольких процентов). Вместо s введем эффективный показатель адиабаты $\eta = 1 + 2/s$. Он принимает значения $1{,}20 \div 1{,}33$ для разрядов в воздухе при давлениях, близких к атмосферному. Если ток растет по закону $i = At^{\alpha}$, то как нетрудно заметить, решение задачи имеет вид

$$r_k = Bt^{\beta},$$

где β=1/2+α/3. Таким образом, $r_к = cont \cdot i^{1/3} t^{1/2} \left(c_v / k_0 c_м\right)^{1/6}$, а сопротивление канала $R = const \ell_к c_v^{2/3} \left(k_0 c_м\right)^{1/3} i(t)^{-2/3} t^{-1}$. Слабая зависимость $r_к$ от ρ_v оправдывает допущение о постоянстве ρ_v при расчете радиуса канала.

Найдем численное значение постоянной *B* для линейно-нарастающего тока ($i=i't$), приняв, кроме того η=1,2. В этом случае $B = \left(6/5\right)^{1/2} \left(i'\right)^{1/3} \left(10p^2 k_0 c_м\right)^{1/6}$. Приведем выражение для радиуса канала, принимая k_0=0,9, $\rho_v=5\cdot10^{-5}$ Ом·м:

$$r_к \approx 0{,}1 c_м^{-1/6} \left(i'\right)^{1/3} t^{5/6}.$$

Полученное выражение используется при оценках радиуса искры в газах. Например, при $di/dt=10^9$ А/с и $t=10^{-6}$ *с* для искры в воздухе ($\rho_м$=1,3 кг·м$^{-3}$) имеем $r_к=10^{-3}$ м. При этом скорость роста радиуса близка к 10^3 м/с, давление в канале около 10^6 Па, а сопротивление канала длиной 10^{-2} м в указанный момент составляет около 0,16 Ом и падает пропорционально $t^{-5/3}$.

Таким образом, разряд создает резкое увеличение давления внутри камеры, что может привести к взрыву. Возможность взрыва определяется временными характеристиками разряда в воздухе, а именно является ли время формирования разряда больше времени неодноврменности коммутации в трехфазном выключателе.

При пробое воздушного промежутка время запаздывания, т.е. время с момента подачи напряжения до момента пробоя $t_з$, складывается из времени достижения начального напряжения $t_о$, статистического времени запаздывания, т.е. времени с момента достижения начального напряжения до момента появления электрона, способного создать лавину $t_{ст}$, длительностей развития стримера $t_с$, лидера $t_{лд}$ и главного разряда $t_к$:

$$t_з = t_о + t_{ст} + t_{стр} + t_{лд} + t_к.$$

Время запаздывания зависит от конфигурации электрического поля, скорости нарастания напряжения, давления и рода газа и ряда других факторов.

В газовых промежутках с неоднородным электрическим полем время запаздывания в основном определяется слагаемыми $t_о$ и $t_{лд}$. Время достижения начального напряжения при неизменной скорости нарастания напряжения возрастает по мере уменьшения неоднородности электрического поля, так как при этом растет $B_{н}$. С увеличением скорости нарастания и неизмененных прочих условиях $t_о$ уменьшается.

Для промежутка с однородным электрическим полем при напряжении, незначительно превышающем статическое разрядное, т.е. полученного при медленном подъеме напряжения, времена формирования стримера, искрового канала становятся малыми по сравнению с $t_о$ и $t_{ст}$, поэтому время запаздывания в основном определяется этими составляющими.

Статистическое время запаздывания зависит от многих факторов, а в конечном счете от количества свободных электронов в активном объеме промежутка, т.е. в объеме, где $E > E_и$ или, что равнозначно, $\alpha^* = \alpha - \eta > 0$. Активный объем увеличивается при выравнивании электрического поля, росте расстояния между электродами или приложенного напряжения. Скорость возникновения электронов в единице объема воздуха обусловлена уровнем естественной радиации и составляет порядка $(1\text{-}10)\cdot10^6$ $1/(м^3\cdot с)$ при p = 0,1 МПа. Надо иметь в виду, что в воздухе большая часть возникающих электронов прилипают к молекулам кислорода, образуя отрицательные ионы. Повышение давления газа приводит к уменьшению $t_{ст}$, так как при этом растет концентрация атомов или молекул газа и при неизменной

естественной радиации увеличивается скорость возникновения электронов. Статистическое время запаздывания зависит также от величины перенапряжений, (рис.4.26). Чем больше кратность перенапряжения $U_{п}/U_{п\ ст}$, тем меньше $t_{ст}$.

Одной из характеристик промежутка является коэффициент импульса $k_{и}$, который равен отношению среднего разрядного напряжения к статическому разрядному, т.е. разрядному напряжению при медленном подъеме напряжения. Чем меньше $t_{ст}$, тем ближе разрядное напряжение к статическому разрядному и тем меньше коэффициент импульса.

Напряженность $E(x,t)$ пропорциональна приложенному напряжению, где коэффициент пропорциональности зависит от конфигурации электрического поля, т.е.

$$E(x,t) = q(x)u(t).$$

При начальном напряжении

$$E(x,t) = E_{н} = U_{н}q(x).$$

Принимая во внимание, что $dx = v(x,t)dt$, получим: $dx = aq(x)\ [\ u(t) - U_{н}]dt$, откуда

$$\int_{0}^{S} dx / [aq(x)] = \int_{t_0}^{t_0 + t_A} [u(t) - U_{н}]\, dt, \qquad (4.25)$$

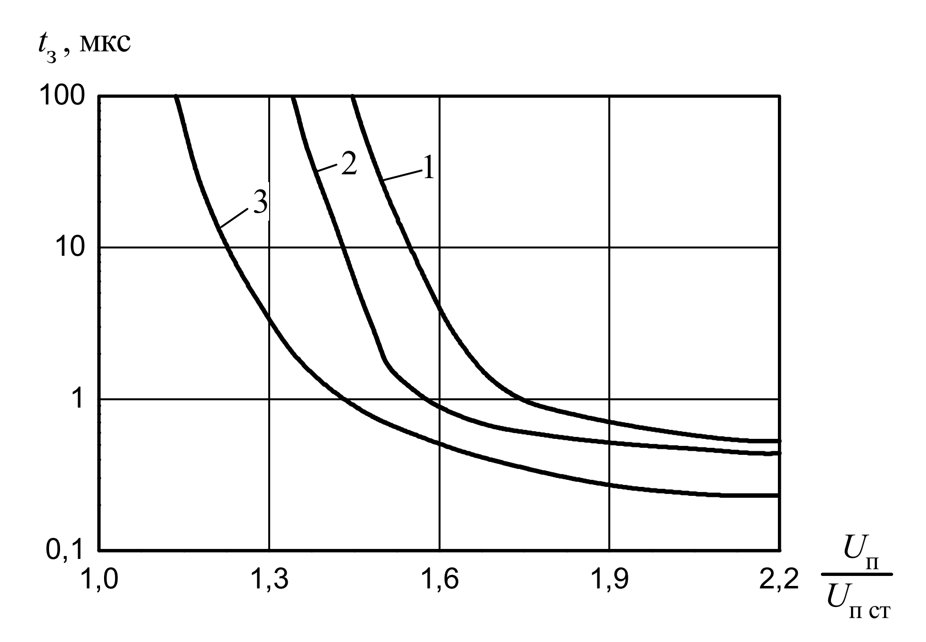
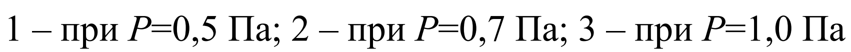


Рис. 4.26. Связь между статистическим временем запаздывания и перенапряжением (расстояние между контактами 1,1 мм):



1 – при P=0,5 Па; 2 – при P=0,7 Па; 3 – при P=1,0 Па

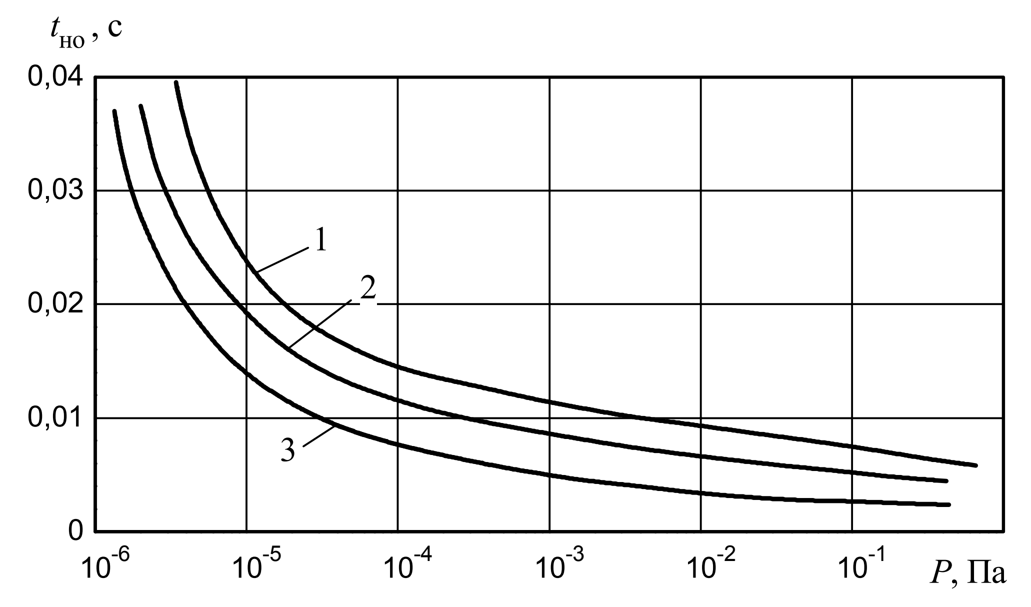


Рис. 4.27. Граничная характеристика зависимости времени неодновременности размыкания контактов от давления в камере: 1 – при кратности напряжения 0,5; 2 – при кратности напряжения 1,0; 3 – при кратности напряжения 1,5

где t_o – время достижения начального напряжения, S – длина промежутка, t_A – время, за которое стример развивается до противоположного электрода. В уравнении (4.25) левая часть зависит только от конфигурации электрического поля, поэтому для определенной системы электродов правая часть уравнения

равна постоянной и формально равна площади на вольт-секундной характеристике данной системы.

Видно, что при определенных значениях давления $P_{кр}$ регламентированные требования к $t_{но}$ оказываются недопустимыми. Рассмотренный анализ позволяет отметить следующее, что последствия от потери вакуума во многом зависит от неодновременности коммутаций фаз выключателя (рис. 4.27). При правильной настройке привода выключателя последний может долго находиться в эксплуатации без каких-либо последствий. Однако контактная система подвергается воздействию, которое приводит к оплавлению поверхности электродов (Рис. 4.22, б). Исследования более 30 камер, побывавших в эксплуатации, показывает, что, как правило, изменений переходного сопротивления при этом за пределы допуска не происходит. Однако износ контактов происходит значительно быстрее.

Традиционными признаками, используемыми при выявлении потери вакуума являются: контроль пробивного напряжения $U_{пр}$, приложенного к разомкнутым контактам выключателя, контроль давления внутри камеры. Первый из них обеспечивает выявление дефекта только при выведении выключателя из ячейки при ремонтах или профилактике, то есть обеспечивается периодический контроль, частота которого не зависит от

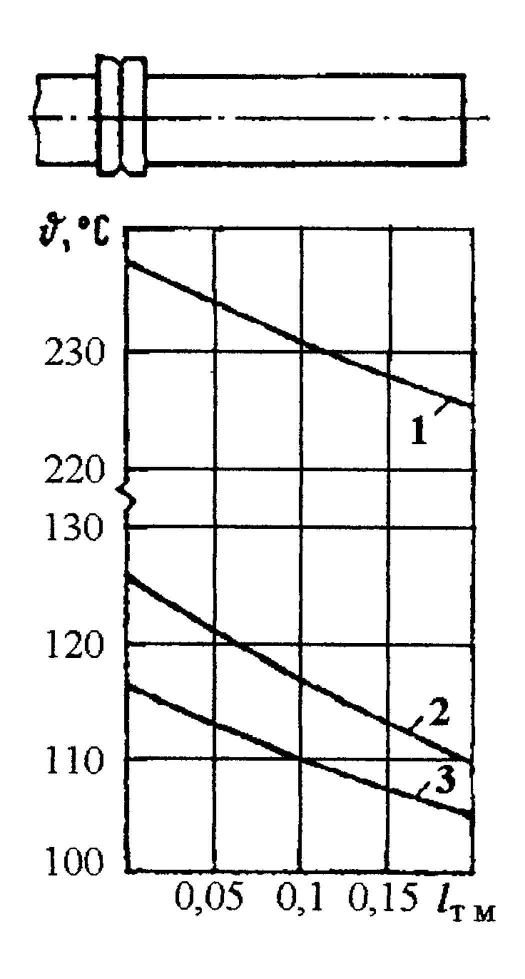


Рис. 4.28. Распределение температуры вдоль токопровода

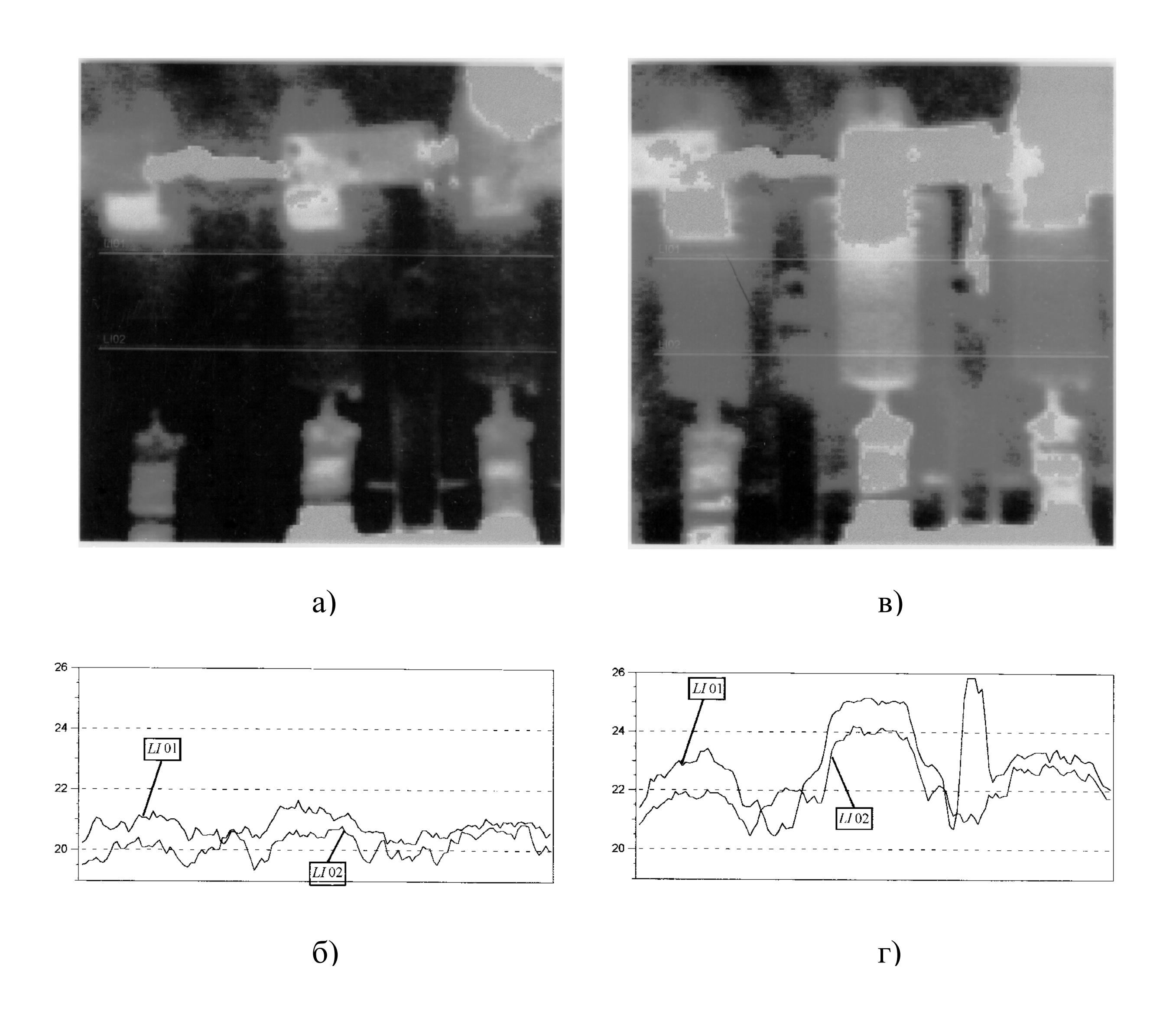


Рис. 4.29. Термограммы и графики температур вакуумного выключателя

реально необходимой. Контроль давления является прямым методом выявления разгерметизации, но требует конструктивных изменений в вакуумной камере, которая приводит к удорожанию выключателя в целом.

Проведенные исследования показывают, что наиболее приемлемым признаком выявления потери вакуума является контроль температуры стенок камеры. Действительно, в бездефектной камере нагрев конструктивных элементов происходит в тангенциальном направлении от контактов к токоведущим частям. Распределение температуры вдоль токопровода показаны на рис. 4.28 кривые 1 и 2 для токопровода без теплопередающего устройства с токами соответственно 2500 и 1600 А, кривая 3 – для токопровода с теплопередающим устройством. Передача тепла через объем камеры не происходит.

При разгерметизации появляется теплопередающая среда, которая приводит к повышению температуры стенок поврежденной фазы. В качестве исследуемого использован выключатель ВВБ.

Термографический анализ осуществлялся тепловизионной камерой «Thermovision™ – 470». На рис. 4.29 показаны термограммы, полученные при протекании токов по токоведущим частям 400 А при номинальном токе выключателя 1000 А. Из рисунка видно, что при разгерметизации температура фазы В с дефектом выше на два градуса соседней камеры.

В дальнейшем дистанционный контроль температуры был использован при обследовании более 1100 выключателей, что подтвердило возможность выявления потери вакуума на основе дистанционного контроля температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коган Ф.Л. Анормальные режимы мощных турбогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.

3. Мозгалевский А.В. Автоматический поиск неисправности. – Л.: Машиностроение, 1967.

4. Васильев И.В. Распознающие системы. – Киев: Наукова думка, 1983.

5. Ковалев Г.Ф., Сеннора М.Б., и др., по ред.Воропай Н.И. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. – Новосибирск; Наука, Сибирское предприятие РАН, 1999.

6. Павлов Г.М., Таджибаев А.И., Защита генератора от асинхронного хода. – СПб.: СПбГТУ, 1995.

7. Таджибаев А.И., Распознавание аномальных состояний электрооборудования электрических станций и подстанций. Синхронные машины. – СПб.: СПбГТУ, 1993.

8. Таджибаев А.И., Монастырский А.Е. Диагностика маслонаполненного оборудования электрических станций и подстанций. – СПб.: СПбГТУ, 1997.

9. Таджибаев А.И., Канискин В.А., Костенко Э.М. Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации // Электричество. – 1995.– № 12.

10. Таджибаев А.И. Преобразование признаков при оценке состояния энергетического оборудования. – СПб.: ПЭИПК, 1996.

11. А.с. 1728809 СССР. Способ определения свойств изоляции энергетических блоков с водяным охлаждением / А.И.Таджибаев, Н.С.Соловьёв, Р.В.Головкин. Опубл. в Б.И., 1991, № 15.

12. А.с. 1775789 СССР. Способ выявления повреждений в электрических цепях ротора синхронной машины / А.И.Таджибаев. Опубл. в Б.И., 1992, № 42.

13. Патент 2056488 Российской Федерации. Способ определения состояния и ресурса изоляции электроустановки / А.И.Таджибаев, Н.С.Соловьёв, В.А.Канискин. Опубл. в Б.И. 1996, № 19.

14. Tadjibaev A.I., Tsypkin M.P. Electrical Motors Condition Monitoring. Proceedings of the 22-nd Annual Meeting of the Vibration Institute. Dearborn, Michigan, 1998.

15. Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника. Оценка состояния изоляции генераторов. / А.И. Таджибаев, В.В. Старовойтенков, Н.М. Ваксер и др. СПб.: СПбГТУ, 2001.

16. Измерение влажности трансформаторного масла. / Дудкин С.М., Монастырский А.Е., Таджибаев А.И. и др. – СПб.: ПЭИПК, 2001.

17. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергия, 1975.

18. Гольдберг О.Д., Абдулаев И.М., Абиев А.Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

19. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления – М.: «Сов.радио», 1976.

Содержание